

THESIS / THÈSE

MASTER EN GÉOLOGIE

Etude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation des essais de traçage de la Lesse souterraine de Furfooz (Dinant)

Poulain, Amael

Award date:
2013

Awarding institution:
Université Libre de Bruxelles

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



UNIVERSITÉ LIBRE DE BRUXELLES
FACULTÉ DES SCIENCES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE
L'ENVIRONNEMENT



Étude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation des essais de traçage de la Lesse souterraine de Furfooz (Dinant)

**Mémoire présenté par Amaël Poulain
en vue de l'obtention du diplôme de Master en Sciences Géologiques**

**Promoteur : Prof. Dr V. Hallet
Département de Géologie
Université de Namur**

Année académique 2012-2013

Remerciements

À l'issue de l'écriture de ce mémoire, je tiens à remercier les nombreuses personnes qui ont participé à l'aboutissement de ces 5 années d'études de géologie.

Le Prof. Vincent Hallet, qui m'a accordé sa confiance tout au long de ce projet et qui s'est montré disponible, attentif et surtout optimiste en toutes circonstances.

Lorraine Dewaide, qui a co-promu ce mémoire et a permis que je me joigne à ce projet. Merci de m'avoir aidé tout au long de l'année et aussi d'avoir gardé espoir pour nos tracages (faudrait pas oublier de fêter ça, à titre gracieux bien entendu) !

Gaëtan Rochez, l'homme qui se cache derrière la plupart des mémoires, thèses, labos et terrains au département de géologie de Namur. Tu mérites sans aucun doute une augmentation !

Isabelle Bonniver, qui s'est replongée avec ferveur dans la turbidité de ses programmes de modélisation favoris. Merci aussi pour tes conseils et tout ce que tu nous as appris durant ces dernières années !

Jean-Benoit Schram du Groupe Spéléo « La corde » de Dinant, qui nous a prodigué ses nombreuses connaissances à propos du karst de Furfooz et qui s'est toujours montré disponible pour nous en faire découvrir d'avantage.

Rudi, pour son chaleureux accueil lors de nos visites à Furfooz (et aussi pour les pizzas et la bière).

Christophe Goffin, gestionnaire du Parc de Furfooz, qui nous a garanti l'accès au parc ainsi qu'aux cavités protégées.

C'est également le moment de remercier ma maman, qui pendant 5 années a consciencieusement corrigé l'orthographe de tous mes travaux. Un jargon de géologue digne des insultes préférées du capitaine Haddock. Pour la correction de ce mémoire je remercie chaleureusement Jean-Pierre Poncin, l'as de l'orthographe !

Je n'oublie pas mes fidèles « couz », qui ont su à leur manière sublimer ces années d'études à Bruxelles ainsi qu'à Namur.

Je remercie finalement Laure pour avoir eu le courage de côtoyer l'ours des cavernes qu'ai pu être durant la rédaction de ce manuscrit !

J'en oublie certainement, ils se reconnaîtront...

Résumé

À Furfooz, dans la région de Dinant, un système karstique « perte – résurgence » de plus de 1 kilomètre forme, au sein des formations carbonatées du Carbonifère, un double recouplement souterrain des méandres de la Lesse. Cette rivière souterraine est observable via certains réseaux karstiques bien connus : le Trou qui Fume, le Puits des Vaux, la Galerie des Sources et le Trou de la Loutre. Ceci offre l'opportunité d'étudier le fonctionnement de la rivière souterraine tout au long de son tracé.

Afin de caractériser au mieux les paramètres hydrologiques et physico-chimiques de la Lesse souterraine, un monitoring du réseau a été mis en place entre avril 2012 et mai 2013. Les niveaux d'eau, les débits, les températures et les conductivités ont ainsi été mesurés durant plus d'une année, à cinq stations réparties le long de la rivière souterraine.

Des essais de traçage ont été menés sur le site de Furfooz afin de préciser le fonctionnement du réseau souterrain. Les résultats des traçages menés dans le cadre de ce mémoire, ainsi que ceux de traçages antérieurs, ont été calculés à l'aide du logiciel Qtracer2 (Field, 2002). Ce logiciel a fourni une estimation des paramètres d'écoulement et de transport qui caractérisent la Lesse souterraine.

À partir des données expérimentales, un modèle conceptuel du fonctionnement de la rivière souterraine a été élaboré. Ce modèle met en évidence la présence d'une vaste zone noyée annexée au drain principal, au niveau du Puits des Vaux. Il tente également d'expliquer l'effet de cette zone noyée sur le comportement d'un traceur injecté dans le système.

Sur base de ce modèle conceptuel, un dimensionnement de l'écoulement a été entrepris. Pour ce faire, le logiciel OTIS a été utilisé pour modéliser les résultats des essais de traçage. Ce programme permet de discrétiser la zone à modéliser, de façon à pouvoir tenir compte de la différence de comportement hydraulique entre la zone noyée et le reste du réseau. Les résultats d'OTIS se sont avérés très satisfaisants en termes de dimensionnement. Le développement d'autres modèles, sur base de nouvelles données, serait donc possible à l'avenir. Ceci pourrait permettre de modéliser ce réseau pour des conditions hydrologiques différentes de celles qui prévalaient lors de l'essai de traçage modélisé.

Abstract

Near Furfooz, in the area of Dinant (Belgium), a karstic system “shallow-hole – resurgence” longer than 1 Km double crosses the aerian Lesse River through the Carboniferous carbonates formations. This underground river is visible via some well-known karst networks : the “Trou qui Fume”, “Puits des Vaux”, “Galerie des Sources” and “Trou de la Loutre”. These offer the opportunity to study the river functioning along its course.

In order to characterize the hydrological and physico-chemical parameters of the subterraneous Lesse, a monitoring system has been established since April 2012. The water-level, flow rate, temperature and electrical conductivity have been recorded for more than one year at five stations along the underground river.

Many tracer-flow tests were conducted in Furfooz to clarify the underground Lesse hydrogeological features. The results of the tracer-flow tests conducted within this work, as well as those of previous one, were calculated by using the software Qtracer2 (Field, 2002). This software provided an estimation of flow and transport parameters for the karstic system.

Based on the monitoring results and those of tracer tests, a conceptual model of the underground river functioning was developed. This model brings to light the existence of a large flooded area directly related to the main flow system and located at the “Puits des Vaux” site. It also attempts to explain the effect of this flooded area on tracer behavior inside the system.

Starting from the conceptual model, the flow system geometrical parameters needed to be calibrated. For this purpose, the tracer-flow tests results were modeled via the software OTIS. The latter is used to discretize the network in order to reflect the difference in hydraulic behavior between the flooded area and the rest of the network. The sizing of the karst conduits obtained from the OTIS model was very satisfactory. Therefore, this model could be used as a base for the development of further models, aiming at simulate the flow processes in various hydrological conditions on basis of new data acquisition.

Table des matières

Introduction générale	1
Partie 1 : Contextualisation du site d'étude.....	2
I. Contexte géographique et géomorphologique du site de Furfooz	2
1. Contexte géographique.....	2
2. Contexte géomorphologique	2
1. Généralités	2
2. Karstification	3
1. Éléments de karstogenèse	3
2. Les phénomènes karstiques de Wallonie	4
3. La karstification des mudmounts waulsortiens de Furfooz	6
II. Contexte géologique	7
1. Situation régionale	7
1. Lithostratigraphie.....	8
2. Conditions paléo-environnementales.....	12
2. Situation locale.....	13
III. Contexte hydrogéologique	14
1. Hydrologie régionale et locale	14
2. Caractérisation des formations géologiques d'un point de vue hydrogéologique	15
Partie 2 : Description et conditions hydrogéologiques de la Lesse souterraine de Furfooz	18
I. Description du réseau karstique de la Lesse souterraine de Furfooz.....	18
1. Généralités et topographies des principaux réseaux	18
1. Premier recoupement de méandre – Réseau est	20
2. Second recoupement de méandre – Réseau ouest	23
2. Utilisation de la géophysique dans la détection de phénomènes karstiques	27
1. Méthodologie de la tomographie électrique	27
2. Résultats et discussion des profils géophysiques.....	29
1. Profil 1.....	29
2. Profil 2.....	30
3. Profil 3.....	30
3. Conclusions de la prospection géophysique	30
II. Conditions hydrogéologiques.....	31
1. Introduction	31
2. Dispositif de mesure.....	31
1. Paramètres météorologiques extérieurs	31
2. Paramètres hydrogéologiques du réseau	31
3. Conditions hydrologiques – Niveaux limnimétriques et débits	32
1. Niveaux limnimétriques	32
2. Débits de la Lesse aérienne et souterraine	35
4. Conditions physico-chimiques.....	37
1. Températures.....	37

2.	Conductivité électrique	38
5.	Historique des essais de traçage qualitatifs	41
1.	Traçages de 1902 (Vandenbroeck et al., 1910)	41
2.	Traçages par le Werkgroep Fysische speleologie (1987-1988)	41
3.	Traçages par le Spéléoklub Hadès (1998)	42
4.	Synthèse des traçages qualitatifs historiques	43
Partie 3 : Modélisation et dimensionnement du système karstique de la Lesse souterraine		44
I.	<i>Introduction et objectifs</i>	<i>44</i>
II.	<i>Nouveaux essais de traçage et quantification des paramètres d'écoulement avec le logiciel Qtracer2 ..</i>	<i>44</i>
1.	Généralités	44
1.	Principe des essais de traçage	44
2.	Informations apportées par les essais de traçage	45
2.	Calibration des paramètres des courbes de restitution avec le logiciel Qtracer2 (Field, 2002)	46
1.	Description de Qtracer2 (Field, 2002)	46
2.	Quantification des paramètres (Field, 2002)	47
1.	Masse de traceur restituée et taux de restitution	48
2.	Temps moyen de séjour et vitesse moyenne	49
3.	Dispersion longitudinale et dispersivité longitudinale	49
4.	Géométrie de la zone d'écoulement	51
5.	Caractéristiques hydrodynamiques	51
3.	Description et résultats des nouveaux essais de traçage (2008-2013)	52
1.	Traçage n°1	53
2.	Traçage n°2	54
3.	Traçage n°3	55
4.	Traçage n°4	55
5.	Traçage n°5	56
6.	Traçage n°6	57
7.	Traçage n°7	59
8.	Traçage n°8	60
9.	Traçage n°9	61
4.	Conclusions de la campagne de traçages et de la calibration Qtracer2	65
III.	<i>Modélisation des résultats des essais de traçage et dimensionnement du réseau karstique avec le logiciel OTIS</i>	
1.	Introduction	66
2.	Essai de traçage modélisé	67
1.	Résultats de l'essai de traçage	67
2.	Commentaire des résultats de l'essai de traçage	69
3.	Présentation du logiciel de modélisation OTIS (Runkel, 1998)	69
1.	Introduction	69
2.	Principes théoriques du modèle	69
1.	L'emmagasinement temporaire	69
3.	Postulats de base du modèle	71

1.	Postulats pour le conduit principal	71
2.	Postulats pour la zone d'emmagasinement.....	71
4.	Équations du modèle	72
5.	Solution numérique.....	73
1.	Le système conceptuel.....	73
2.	Méthode de Crank-Nicolson	74
1.	Concentration en soluté dans le conduit principal.....	74
2.	Concentration en soluté dans la zone d'emmagasinement temporaire	75
3.	Conditions limites du modèle	75
1.	Condition à la limite amont	75
2.	Condition à la limite aval	76
4.	Modèle conceptuel de la Lesse souterraine de Furfooz	77
1.	Fonctionnement du système.....	77
2.	Découplage des courbes de restitution	78
5.	Modélisation des traçages avec le logiciel OTIS	79
1.	Méthodologie de modélisation	79
2.	Étape 1 : Modélisation du processus de transport convectif.....	81
1.	Construction du modèle convectif.....	81
2.	Calibration du modèle convectif	82
1.	Reach 1 : Sous-système « Chantoir des Nutons – Trou qui Fume »	82
2.	Reach 2 : Sous-systèmes « Trou qui Fume – Puits des Vaux » et « Puits des Vaux – Galerie des Sources ».....	83
3.	Reach 3 : Sous-système « Galerie des Sources – Trou de la Loutre ».....	83
3.	Sensibilité du modèle convectif.....	85
3.	Étape 2 : Modélisation du transport diffusif	89
1.	Construction du modèle diffusif	89
2.	Calibration du modèle diffusif	90
1.	Reach 1 : Sous-système « Chantoir des Nutons – Trou qui Fume ».	90
2.	Reaches 2 et 3 : Sous-systèmes « Trou qui Fume – Puits des Vaux » et « Puits des Vaux – Galerie des Sources »	90
3.	Reach 4 : Sous-système « Galerie des Sources – Trou de la Loutre ».....	91
3.	Sensibilité du modèle diffusif.....	92
4.	Étape 3 : Unification des deux modèles d'écoulement.....	94
5.	Limites du modèle	95
6.	Validation du modèle	95
1.	Modélisation du système « Galerie des Sources – Trou de la Loutre »	95
2.	Discussion des résultats de la validation du modèle	97
6.	Conclusions de la modélisation OTIS.....	98
	Conclusions générales et perspectives	100
	Bibliographie	102
	Annexes	104

Introduction générale

La vallée de la basse Lesse et ses spectaculaires affleurements de calcaires du Tournaisien et du Viséen comptent parmi les régions les plus karstifiées du territoire belge. Parmi les lithologies carbonatées du Carbonifère, les calcaires et dolomies de la Formation de Waulsort, dans la région de Dinant, présentent de très nombreux phénomènes karstiques tout à fait remarquables. Cette formation constitue une série d'ensembles lenticulaires allongés, de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Les équivalents latéraux de ces « mudmounds waulsortiens » sont les formations de Bayard, de Leffe et de la Molignée, toutes trois carbonatées et également intensément karstifiées.

Au niveau des méandres de la Lesse à Furfooz, cet ensemble de formations du Carbonifère abrite un réseau karstique actif de type perte-résurgence. Celui-ci a formé un double recoupement souterrain de méandre ; depuis la perte principale (le Chantoir des Nutons) jusqu'à la résurgence principale (le Trou de la Loutre), il existe plus d'un kilomètre de réseau souterrain, dont près de 500 mètres sont accessibles spéléologiquement. Sur ce tracé, trois « regards » sont possibles sur la Lesse souterraine : le Trou qui Fume, le Puits des Vaux et la Galerie des Sources. Ce système offre donc une belle opportunité d'étudier le fonctionnement hydrogéologique d'un réseau karstique actif.

Le premier objectif de ce travail a été d'étudier les conditions hydrogéologiques du réseau souterrain. Dans cette optique, cinq stations de mesures ont été mises en place afin de permettre un suivi des paramètres (niveaux d'eau, débits, températures, conductivités) de la rivière souterraine et d'en évaluer le comportement durant une année.

Dans un deuxième temps, il s'agissait de comprendre le fonctionnement du système karstique actif. À ce titre, les essais de traçage sont des outils d'investigation indirecte indispensables. Les traçages historiques, réalisés depuis le début du 20^e siècle, constituent la base de l'étude moderne en ce qui concerne les connexions existantes et les temps de transit. À l'heure actuelle, les essais de traçages permettent d'investiguer toujours plus précisément les réseaux karstiques. Ils peuvent notamment fournir des informations à propos des paramètres d'écoulement et de transport qui prévalent dans le système tracé. Afin de permettre une étude approfondie du système d'écoulement de la Lesse souterraine, de nouveaux essais de traçage ont été réalisés sur le site de Furfooz. En tout, cinq traçages ont été menés dans le cadre de ce mémoire, ajoutés à 4 autres réalisés en 2008. L'utilisation du logiciel Qtracer2 (Field, 2002) a permis l'analyse des courbes de restitution du traceur et le calcul des paramètres propres à l'écoulement et au transport dans le réseau.

L'objectif ultime de cette étude était le dimensionnement du réseau d'écoulement de la Lesse souterraine. Le logiciel OTIS (One-dimensional Transport with Inflow and Storage ; Runkel, 1998) a été choisi dans ce but. Ce programme permet la modélisation de résultats d'essais de traçage afin de calibrer les paramètres d'écoulement et de dimensionner le réseau tracé. Le principal atout de cette méthode est de permettre l'estimation, en termes de volume, des réseaux inaccessibles (noyés ou non découverts) à partir d'un outil développé initialement pour la caractérisation des réseaux superficiels.

Partie 1 : Contextualisation du site d'étude

I. Contexte géographique et géomorphologique du site de Furfooz

I.1. Contexte géographique

Le site de Furfooz se situe à environ 5 kilomètres au sud-est de la ville de Dinant, dans la province de Namur (Belgique) (**Figure I-1**). Il se localise dans la vallée de la basse Lesse entre les villages de Furfooz au nord, Gendron à l'est et Hulsonniaux au sud (**Figure I-2**). La Lesse est une rivière affluente de la Meuse à Anseremme, village se situant à 4 kilomètres au nord-ouest de la zone d'étude. La majeure partie de la zone étudiée se situe dans le Parc et la réserve naturelle de Furfooz, gérée par l'ASBL Ardenne et Gaume. D'une superficie totale de 52 ha, cette réserve représente un site d'un grand intérêt biologique, géologique et préhistorique puisque de nombreux sites karstiques ont été occupés par l'homme depuis près de 14 000 ans.

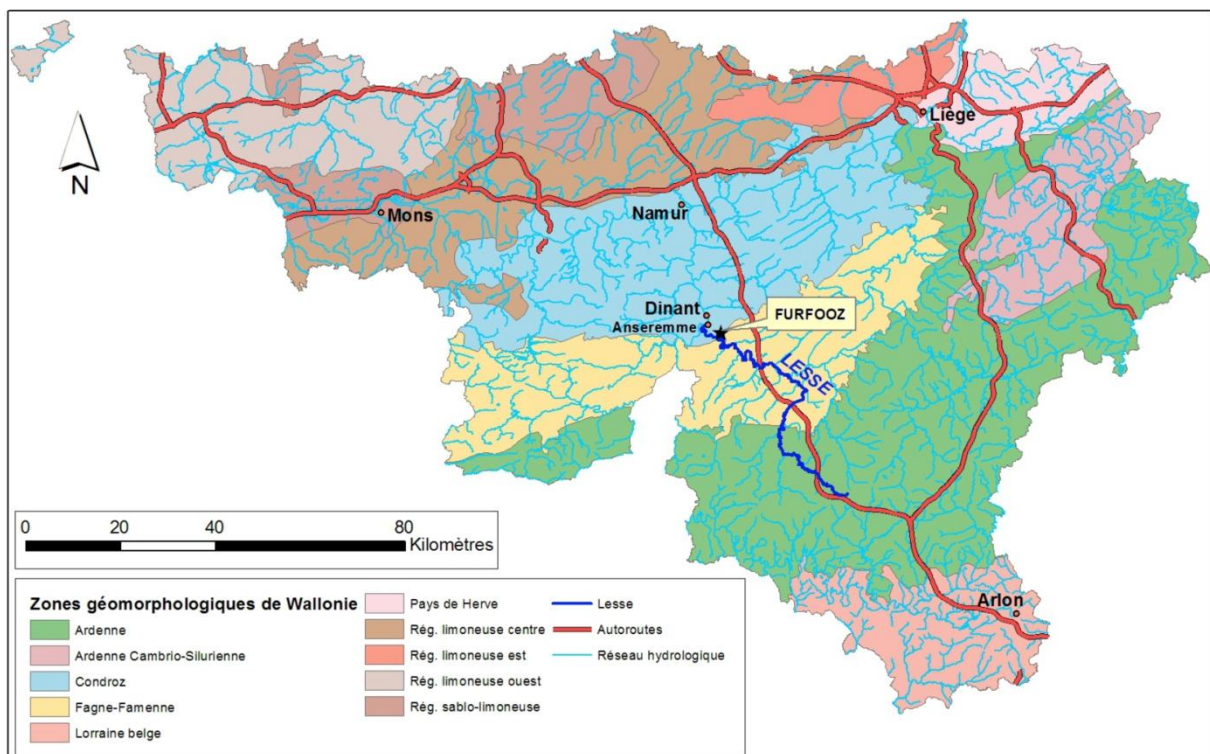


Figure I-1 : Localisation du site de Furfooz sur la carte des zones géomorphologiques de Wallonie.

I.2. Contexte géomorphologique

I.2.1. Généralités

La région de Furfooz est située en bordure sud de la région wallonne du Condroz. Le Condroz est une région naturelle de Belgique au relief plissé. Celui-ci s'est mis en place à la faveur de l'érosion différentielle entre les différentes lithologies (calcaires, grès, pélites) affleurant dans la région. Cette érosion, essentiellement fluviale, sculpte le paysage depuis le Cénozoïque moyen à supérieur (Quinif & Vandycke, 2001).

La géomorphologie locale est entièrement façonnée par le passage de la Lesse. Celle-ci s'écoule à une altitude d'une centaine de mètres et forme une vallée profondément encaissée dans le substratum, essentiellement calco-gréseux. Au nord de la Lesse, on retrouve la Tienne de Chaleux, un plateau de calcaires carbonifères compris entre 200 et 300 mètres d'altitude. Au sud, un plateau schisto-gréseux au niveau d'Hulsonniaux, vers 250-280 mètres d'altitude, marque le passage progressif vers la dépression de la Famenne. Entre ces deux plateaux, la Lesse méandre au travers d'un important massif de calcaires carbonifères. C'est à la faveur de cette traversée que la Lesse a formé le double recouplement souterrain de méandre observable dans le massif de Furfooz (**Figure I-2**).

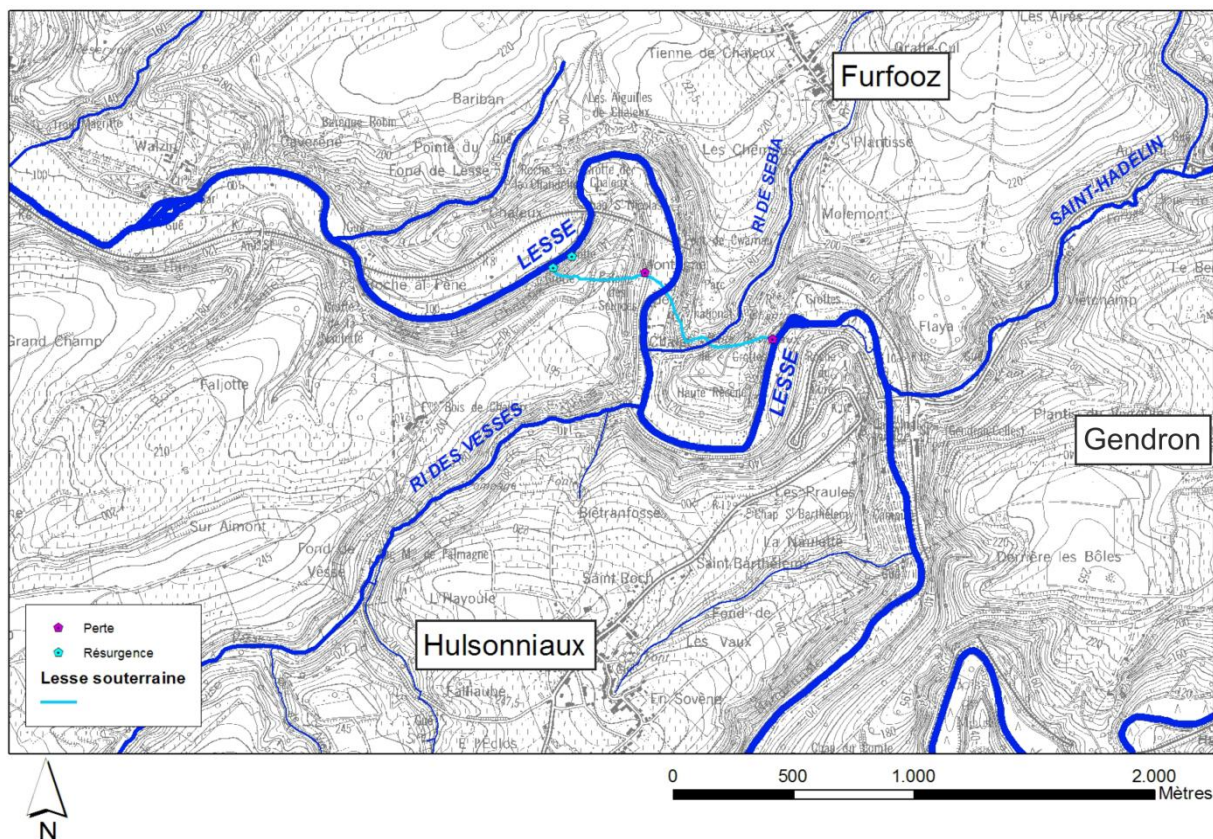


Figure I-2 : Localisation du site d'étude – La Lesse et son double recouplement de méandre ainsi que ses principaux affluents dans la région de Furfooz.

I.2.2. Karstification

I.2.2.1. Éléments de karstogenèse

Comme la plupart des lithologies carbonatées de Wallonie, les calcaires et dolomies de cette région présentent de nombreux phénomènes karstiques remarquables. Selon Quinif (1999), le karst est un système thermodynamique qui se structure au cours du temps grâce à la dissipation de différents types d'énergies qui sont mises en jeu. Celles-ci sont les énergies chimique, potentielle et mécanique (**Figure I-3**).

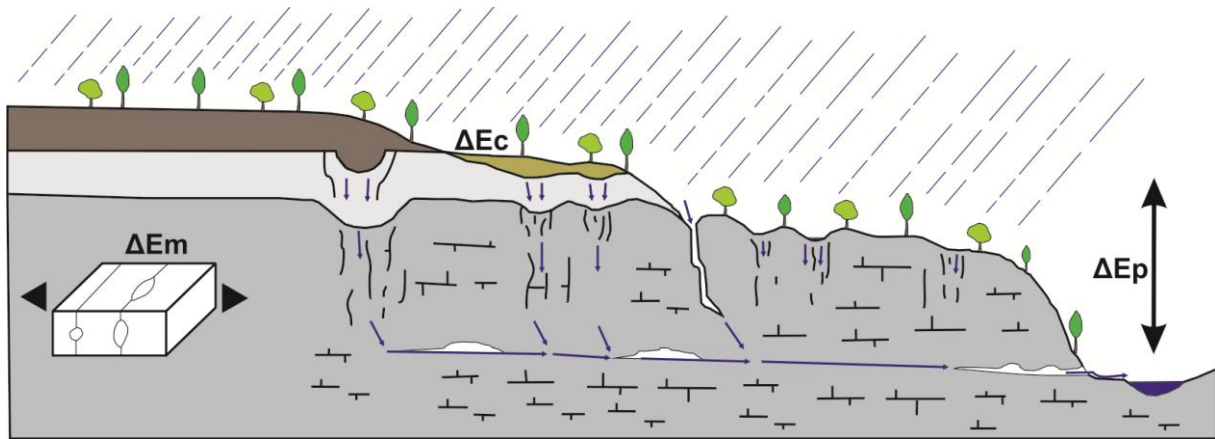


Figure I-3 : Contexte de la karstification sous forme de coupe synthétique – ΔEp : énergie hydrodynamique potentielle sous forme de dénivellation et/ou de débit, ΔEc : énergie chimique de par le CO_2 présent dans l'atmosphère et les sols, ΔEm : énergie mécanique conditionnée par une tectonique active (Quinif, 1999 – modifié).

Ces trois énergies doivent se dissiper simultanément pour qu'un massif calcaire se karstifie. L'énergie chimique représente l'action de l'acide carbonique qui dissout les carbonates. De l'eau et du CO_2 sont donc nécessaires pour avoir de l'énergie chimique. L'énergie potentielle est dépendante de la différence d'altitude entre les zones d'alimentation et les zones de sortie du système, ainsi que des débits d'eau circulant dans le système. L'énergie mécanique est dépendante d'une tectonique active du massif qui va permettre à l'eau de circuler dans des discontinuités suffisamment ouvertes par détente mécanique.

1.2.2.2. Les phénomènes karstiques de Wallonie

Les phénomènes karstiques de l'Allochtone ardennais sont localisés dans les formations carbonatées datées principalement du Dévonien Supérieur (Eifélien, Givétien, Frasnien) et du Carbonifère (Dinantien) pour ce qui concerne la région du Condroz-Ardenne (**Figure I-4**).

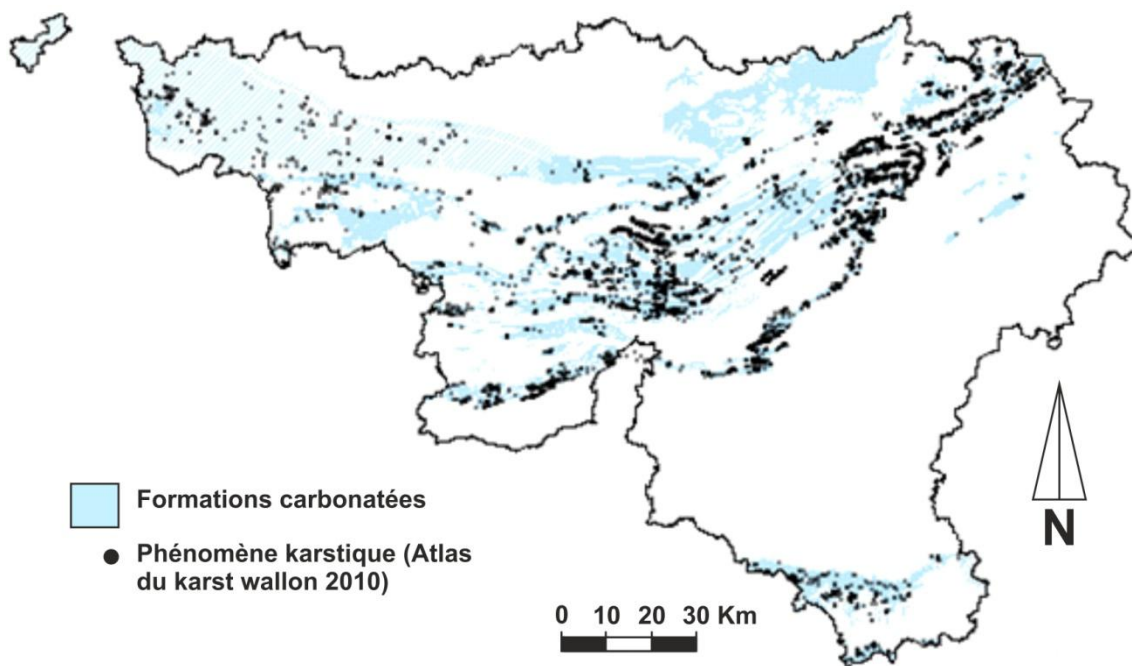
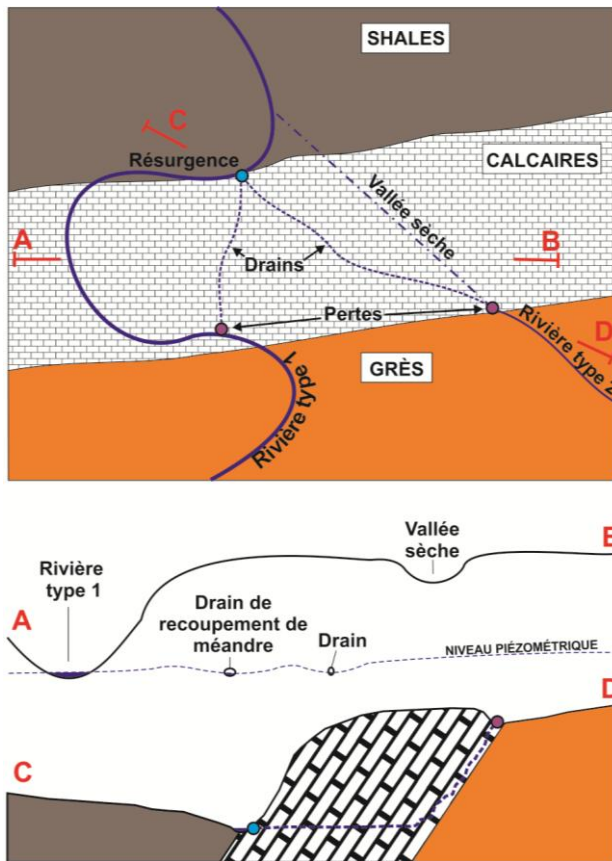


Figure I-4 : Cartographie des principaux phénomènes karstiques recensés en Wallonie (CWEPS, 2010 – modifié).



D'après Quinif (1999), le karst ardennais est le résultat de l'évolution Cénozoïque de l'Ardenne (il emploie le terme Ardenne au sens large, c'est-à-dire l'Ardenne géologique s.s, le Condroz, la Fagne-Famenne et l'Entre Sambre et Meuse). À cette période, le massif hercynien plissé et faillé est incisé progressivement par des rivières épigénétiques qui se sont développées sur une couverture meuble récente. Celles-ci recoupent sans distinction les formations karstifiables et non karstifiables, juxtaposées par la tectonique hercynienne. Ces rivières sont qualifiées de « rivières de type 1 » (Quinif, 1977) et sont à pente faible, souvent méandrantes et à débits moyens à élevés.

Figure 1-5 : Les différents réseaux karstiques en Belgique (Quinif, 1977 – modifié).

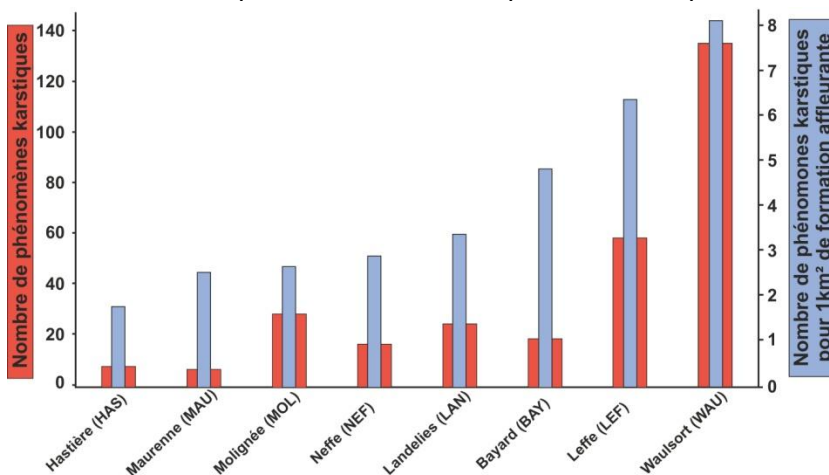
Avec l'enfoncement des rivières de type 1 et la pénéplanation de l'Ardenne, se développent progressivement des rivières dites de type 2. Celles-ci sont affluentes du réseau épigénétique et présentent des pentes plus fortes et des débits plus faibles pour des tracés plus rectilignes.

Ces deux types de rivières vont induire les deux types de réseaux karstiques communs de l'Ardenne (**Figure 1-5**). Les rivières de type 1, profondément enfoncées dans le socle primaire, vont créer des réseaux de type « recoupement de méandre », tel le cas de Furfooz ou encore de Han-sur-Lesse sur le cours de la Lesse. Ce sont des réseaux présentant des pertes importantes (partielles ou totales) suivies de galeries horizontales pouvant descendre à plusieurs dizaines de mètres sous la surface piézométrique. L'énergie potentielle est, ici, surtout représentée par les hauts débits transitant par le karst, étant donné que la différence d'altitude est faible.

Les rivières de type 2 vont créer des réseaux de type chantoir-résurgence, creusés dans les bandes calcaires tributaires des rivières épigénétiques. Vu les faibles débits, c'est la différence d'altitude entre la zone d'alimentation (chantoirs et/ou vallon sec) et la résurgence (niveau de base) qui constitue la source d'énergie potentielle.

1.2.2.3. La karstification des mudmounds waulsortiens de Furfooz

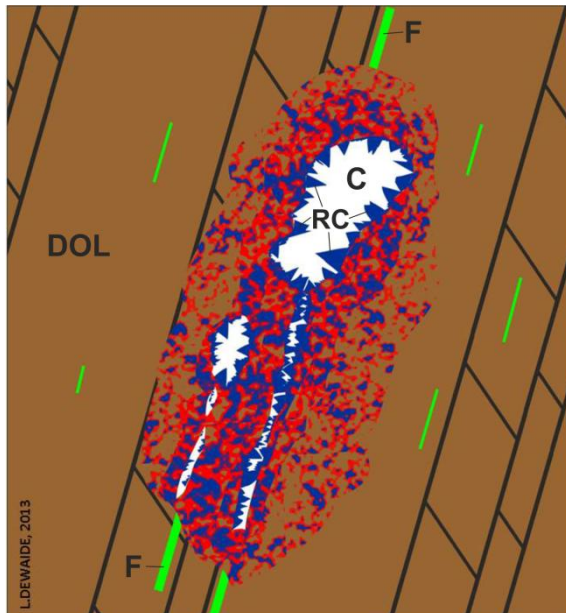
Les mudmounds waulsortiens présentent la particularité d'être abondamment karstifiés comparativement aux formations carbonatées adjacentes dans la région de Dinant (**Figure I-6** et **Figure II-6**). Cette constatation peut sembler étonnante lorsque l'on sait que de nombreuses sections de ces lentilles sont dolomitisées. Le canevas généralement accepté est que les calcaires ont un taux de dissolution plus élevé (3 à 60 fois) que les dolomies. Cette situation particulière, ainsi que le fait que la karstogenèse des mudmounds



waulsortiens n'ait jamais été étudiée, a conduit la mise en place d'une thèse de doctorat sur le sujet à l'Université de Namur.

Figure I-6 : Répartition des phénomènes karstiques entre les formations carbonatées de la région de Furfooz (De Schepper, 2007).

Les premières observations (Dewaide et al., soumis) montrent qu'une karstification particulière se développe principalement dans les parties dolomitisées des mudmounds waulsortiens. Celle-ci se présente sous la forme de lentilles de calcite comportant de nombreuses cavités ainsi que 3 faciès typiques (**Figure I-7**):



- **Dolomie** : elle constitue l'encaissant, il s'agit d'une dolomie secondaire issue de la dolomitisation des calcaires du Waulsortien.

- **Dolomie dédolomitisée** : les analyses de cathodoluminescence des échantillons de la lentille de calcite montrent qu'il s'agit en réalité d'une dolomie dédolomitisée, résultant du remplacement partiel à total de la dolomite originelle par de la calcite.

- **Calcite dans les cavités** : les micro- à macro-cavités sont fréquentes dans la partie dédolomitisée. Les cristaux de calcite peuvent y atteindre plusieurs centimètres.

Figure I-7 : Schéma type des phénomènes karstiques développés dans le waulsortien – C : cavité, DOL : encaissant dolomitique, RC : rhomboèdres de calcite, F : faille, couleur rouge : dolomie dédolomitisée, couleur bleue : calcite (Dewaide et al., soumis).

Dewaide et al. (soumis) proposent un modèle génétique basé sur leurs observations. Ce modèle propose une dissolution irrégulière préalable de la dolomite, ayant généré une altérite hétérogène et poreuse ainsi que de nombreuses cavités. Par la suite, un fluide calcique serait venu précipiter de la calcite dans cette porosité. Ceci aurait créé la fabrique de dolomie dédolomitisée observable à l'heure actuelle. Au même moment, les fractures et les cavités ont également été totalement ou partiellement remplies par de la calcite qui a développé des rhomboédres dans les cavités les plus importantes. Le résultat est une lentille de dédolomite hétérogène dans laquelle des micro- et macro-cavités sont remplies par de la calcite.

Les conditions paléoenvironnementales dans lesquelles ce modèle pourrait être vérifié n'ont pas encore été précisées. La détermination d'un modèle de karstogenèse dans les dolomies des mudmounts waulsortiens nécessitera l'utilisation de nombreuses techniques, ceci inclut les isotopes, les datations et les méthodes d'analyse d'inclusions fluides.

II. Contexte géologique

II.1. Situation régionale

D'un point de vue géologique, le massif de Furfooz se situe dans la bordure sud du synclinorium de Dinant (**Figure II-1**). Ce synclinorium consiste en une vaste structure plissée d'orientation générale ouest-est, déversée vers le nord qui affecte la série Dévono-Carbonifère. Cet ensemble fait partie de l'Allochtone ardennais, une unité de charriage résultant de la dynamique orogénique hercynienne au cours du Paléozoïque.

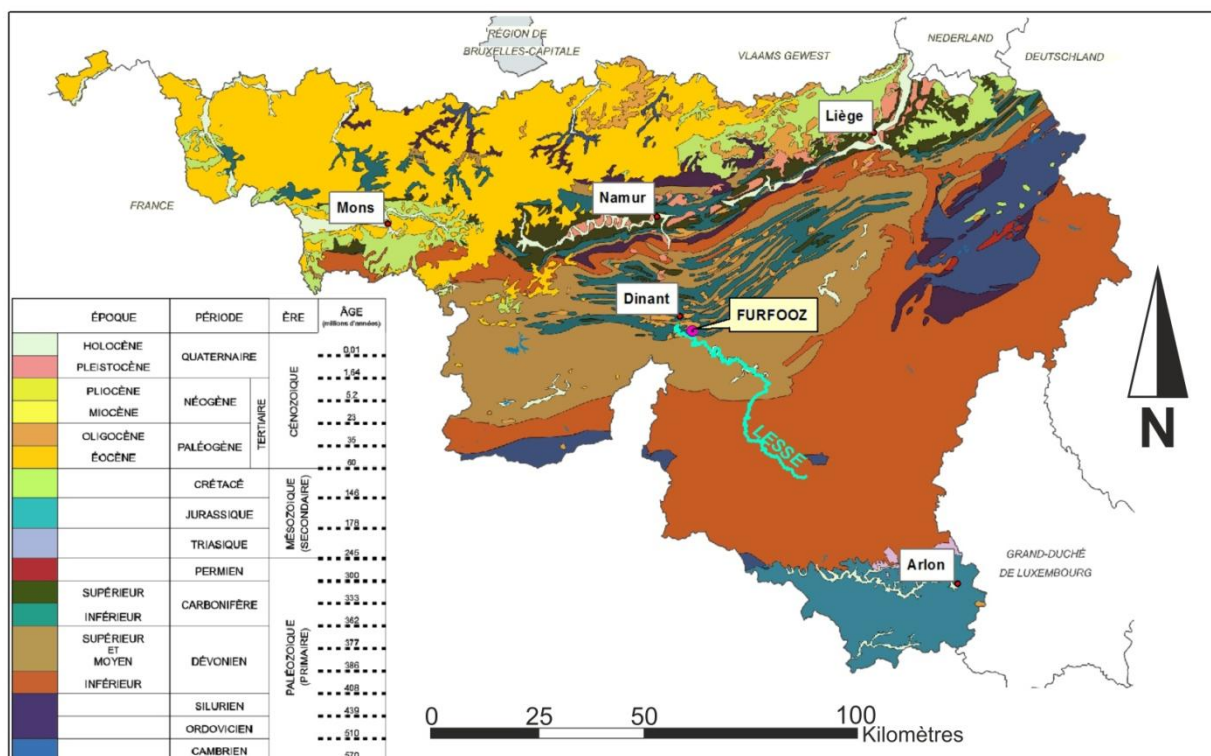


Figure II-1 : Localisation du site d'étude sur la carte géologique de Wallonie (de Béthune, 1961).

II.1.1. Lithostratigraphie

Les formations qui affleurent au niveau du site de Furfooz sont datées du Famennien (Dévonien supérieur) au Moliniacien (Viséen, Carbonifère) avec des âges allant de, environ, 330 à 360 Ma (**Figure II-2**).

Les descriptions des formations reprises ci-dessous sont des simplifications provenant de la nouvelle carte géologique de Wallonie Hastière-Dinant (53/7-8) (Delcambre & Pingot, 1993) et de la synthèse des unités lithostratigraphiques du Dinantien de Belgique (Poty et al., 2001).

- **Formation de Ciney (CIN)**

La Formation de Ciney est essentiellement constituée de grès fins et de siltites. Elle comprend également des calcaires nodulaires à sa base et à son sommet, ainsi que des calcaires stratifiés à son sommet seulement.

Épaisseur : 250 à 300 mètres.

Âge : Famennien supérieur.

ÈRE	SYST.	SÉRIE	ÉTAGE	FORMATION
PALÉOZOÏQUE	CARBONIFÈRE	VISÉEN	MOLINIACIEN	NEFFE
				MOLIGNÉE
			IVOIRIEN	LEFFE
				WAULSORT
		TOURNAISIEN	IVOIRIEN	BAYARD
			HASTARIEN	MAURENNE
				LANDELIES
				PONT d'ARCOLE
				HASTIÈRE
	DÉVONIEN	DÉVONIEN SUPÉRIEUR	FAMENNIEN	CINEY

Figure II-2 : Echelle stratigraphique de Belgique et formations géologiques du site de Furfooz (Delcambre & Pingot, 1993 – modifié).

- **Formation d'Hastière (HAS)**

Formation constituée essentiellement de calcaires crinoïdiques à lits schisteux et calcschisteux.

Épaisseur : 20 à 35 mètres.

Âge : Hastarien.

- **Formation du Pont d'Arcole (PDA)**

Formation constituée essentiellement de schistes fissiles et doux de couleur verdâtre à patine d'altération brun ocre. Elle contient en son sommet quelques bancs de calcaires crinoïdiques.

Épaisseur : 15 à 20 mètres.

Âge : Hastarien.

- **Formation de Landelies (LAN)**

Calcaire souvent argileux, gris foncé, crinoïdique à gros articles de crinoïdes. La formation est stratifiée dans sa partie inférieure, massive vers le haut et contient quelques minces bancs calcschisteux dans sa partie inférieure. À la cassure, ce calcaire dégage une odeur d'hydrocarbure assez caractéristique. Les cassures sont souvent tapissées d'enduits ferriques provenant probablement de l'oxydation des pyrites dispersées dans la roche.

Épaisseur : 35 à 40 mètres.

Âge : Hastarien.

- **Formation de Maurenne (MAU)**

Calcschistes et calcaires argileux gris terne à bancs de calcaire argileux pétris de débris écrasés de brachiopodes, de coraux et de petits crinoïdes, pouvant développer une schistosité intense par endroits (Gendron-Celles, Anseremme). Cherts noirs ou lie-de-vin dans la partie supérieure de la formation.

Épaisseur : 15 à 40 mètres.

Âge : Hastarien / Ivorien.

- **Formation de Bayard (BAY)**

Calcaire nettement stratifié, moyennement à fortement crinoïdique avec ou sans cherts noirs, gris foncé à gris à reflets brunâtres. Cette formation se retrouve :

- dans les régions à monticules waulsortiens, formant la semelle stratifiée des mudmounds, soit au-dessus des calcschistes de Maurenne, soit entre deux lentilles ;
- dans les domaines péri-« récifaux », formant les premiers mètres de calcaire succédant aux calcschistes de Maurenne. Elle constitue partiellement les équivalents stratigraphiques latéraux aux mudmounds waulsortiens dans lesquelles elle peut s'indenter.

Le passage au calcaire de Leffe qui la surmonte est très progressif. Localement ces bancs de calcaire sont partiellement ou totalement dolomitisés.

Épaisseur : de 5 à 30 mètres.

Âge : Ivorien.

• Formation de Waulsort (WAU)

La Formation de Waulsort est constituée de calcaires et de dolomies (diagénétiques) construits, gris clair à gris beige non stratifiés à très mal stratifiés et à disposition lenticulaire très étendue dans le sens de la stratification. Ces calcaires présentent plusieurs faciès (**Figure II-3**) :

- un faciès crinoïdique, rencontré surtout à la base des mudmounds, formé d'un amoncellement important d'articles de crinoïdes de diamètre parfois très important (>1 cm) ;
- un faciès à "veines bleues", souvent riche en fossiles macroscopiques (fenestelles, brachiopodes, crinoïdes). Ces veines bleues peuvent être très abondantes et sont constituées d'un ciment sparitique ayant comblé des cavités laissées vides par un organisme constructeur énigmatique ;
- un faciès fin (biomicritique), formé de calcaire gris clair en apparence fort homogène, parfois vaguement stratifié et développé dans la partie supérieure des monticules.

Ces monticules waulsortiens se sont développés dans l'auge dinantaise (ou « aire de sédimentation de Dinant » ; **Figure II-4** et **Figure II-5**) à la fin du Tournaisien. À partir d'une semelle crinoïdique stratifiée (calcaire de la Formation de Bayard), ils ont formé des lentilles de 300 à 400 mètres d'épaisseur et de plusieurs kilomètres de diamètre (Lees et al., 1985). L'organisme constructeur demeure encore inconnu. Les veines bleues pourraient en constituer les traces. Cependant, ce faciès n'est pas étendu à l'ensemble de l'édifice.

Les formations de Bayard et de Leffe représentent les faciès latéraux proximaux des monticules waulsortiens, dans lesquels ils sont indentés. Les mudmounds waulsortiens ont formé de grands reliefs sous-marins au large de la rampe tournaisienne du bassin de Dinant. Ces reliefs ont conditionné la sédimentation ultérieure dans l'auge dinantaise et notamment la mise en place du calcaire de la Formation de la Molignée dans un environnement isolé et dysoxique au Moliniacien.

Lees et al. (1985) ont proposé un schéma d'édification en quatre phases, mises en évidence par quatre biofaciès distincts indiquant :

- un développement initial sous une importante tranche d'eau, sous la zone photique et sous l'action des tempêtes (absence d'algues vertes dans les faciès inférieurs) ;
- un développement terminal "frangeant" : apparition des algues vertes encroûtantes, gastéropodes abondants, micritisation.

Épaisseur : Variable suivant le développement et la situation dans l'ensemble lenticulaire, de 0 à plus de 300 mètres.

Âge: Ivorien - Moliniacien inférieur.

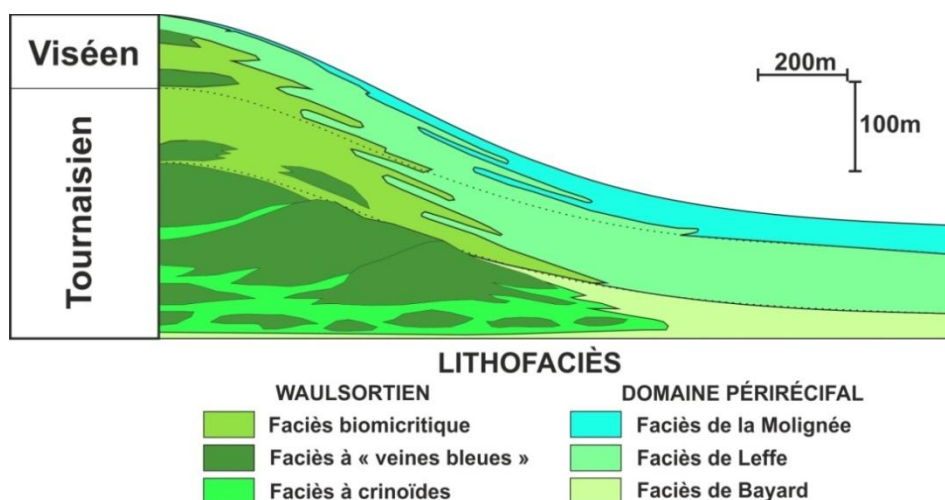


Figure II-3 : Répartition des divers lithofaciès dans le système sédimentaire waulsortien (Lees et al., 1977 – modifié)

- **Formation de Leffe (LEF)**

Ces calcaires constituent les équivalents latéraux des parties supérieures des monticules waulsortiens. Ils ont été formés à partir de courants de turbidité sur les pentes et le pourtour des édifices waulsortiens qui se démantelaient. Il s'agit d'un calcaire gris clair nettement stratifié en bancs parfois épais (>1 m), avec ou sans cherts. La transition vers les calcaires noirs de la Molignée s'opère progressivement par l'apparition de plaquettes de calcaire noir alternant avec les bancs de calcaire clair à reflets violacés caractéristiques de la Formation de Leffe. Par endroit, ce calcaire est totalement dolomitisé.

Épaisseur : De 5 à 75 m en fonction de la position par rapport aux monticules waulsortiens. Au niveau de Furfooz, la Formation de Leffe fait environ 30 mètres d'épaisseur.
Âge : Ivorien et localement Moliniacien.

- **Formation de la Molignée (MOL)**

Cette formation est constituée de calcaires et, plus rarement, de dolomies noires. L'ensemble est stratifié en bancs peu épais (<1 m) et en plaquettes alternant avec des unités de calcaire gris foncé finement grenu en bancs plus épais. Ces calcaires peuvent contenir quelques cherts, surtout dans la partie sommitale de la formation. Le calcaire de la Molignée constitue les prolongements latéraux des parties sommitales des mudmounds waulsortiens et représente un faciès de lagon confiné, protégé à l'arrière de ces édifices waulsortiens.

Épaisseur : de 0 à plus de 150 mètres. Comme pour le calcaire de Leffe, le relief waulsortien a influencé le développement et l'épaisseur des calcaires noirs de la Molignée.
Âge : Moliniacien.

- **Formation de Neffe (NEF)**

La formation est formée de calcaire et accessoirement de dolomies grises, le tout étant bien stratifié.

Épaisseur : de 90 à 160 mètres.

Âge : Moliniacien supérieur.

II.1.2. Conditions paléo-environnementales

Ces formations se sont mises en place dans l'aire de sédimentation de Dinant, en marge du massif émergé Brabant-Londres situé au nord (**Figure II-4**). Cette zone a été fortement influencée par le développement d'épais monticules waulsortiens qui ont formé une barrière discontinue à la fin du Tournaisien et mis en place latéralement des sédiments d'eau profonde tels que les calcaires noirs de la Formation de la Molinee (**Figure II-5**).

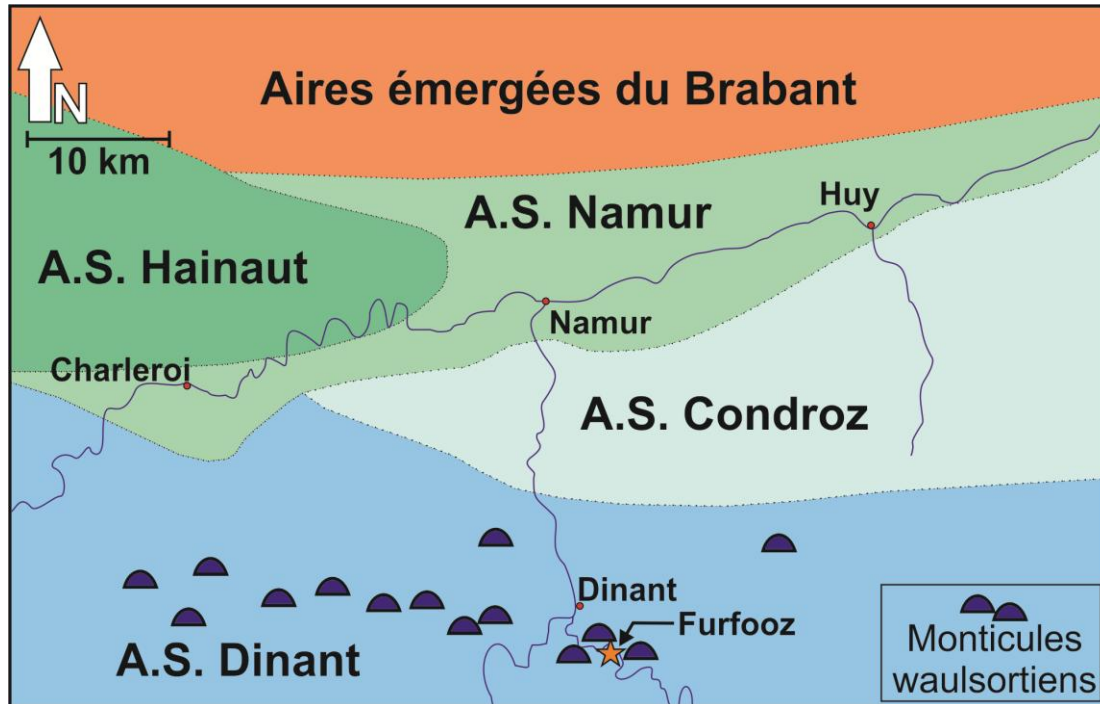


Figure II-4 : Aires de sédimentation du bassin de Namur-Dinant au Tournaisien-Viséen et aires de répartition des faciès de type monticules waulsortiens (carte non palinspastique ; Poty et al., 2001 – modifié).

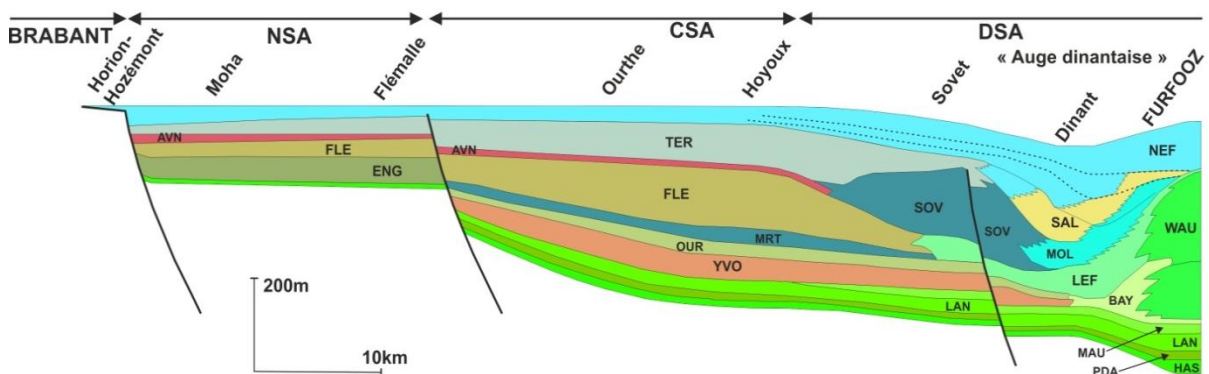


Figure II-5 : Coupe à travers les unités du Tournaisien-Viséen du bassin de Namur-Dinant. NSA : Aire de sédimentation de Namur, CSA : Aire de sédimentation du Condroz; DSA : Aire de sédimentation de Dinant, NEF : Neffe, TER : Terwagne, SAL : Salet, MOL : Molinee, SOV : Sovet, AVN : Avins, FLE : Flémalle, ENG : Engihoul, MRT : Martinrive, LEF : Leffe, OUR : Ourthe, WAU : Waulsort, BAY : Bayard, YVO : Yvoir, MAU : Maurenne, LAN : Landelies, PDA : Pont d'Arcole, HAS : Hastière. (Poty et al., 2001 – modifié).

II.2. Situation locale

Au niveau local, la zone de Furfooz se localise sur le flanc sud d'une structure synclinale complexe formée dans les calcaires carbonifères (le synclinal d'Al Lègne ; **Figure II-6 et Figure II-7**). Le cœur de cette structure est formé des calcaires de la formation de Neffe, datés du Moliniacien (Viséen) tandis que la partie la plus externe, au sud, est formée des grès de la Formation de Ciney (Famennien supérieur). Entre ces deux extrêmes, il affleure, du sud au nord, une série subverticale composée des quatre formations de l'Hastarien (Tournaisien Inférieur) que sont les formations d'Hastière, du Pont d'Arcole, de Landelies et de Maurenne. Plus au nord, un ensemble lenticulaire formé par la formation de Waulsort et ses équivalents latéraux (Formations de Bayard, de Leffe et de la Molinee) forme une structure plissée complexe. Au niveau structurel, deux axes de seconde importance que sont l'anticlinal du Colébi et le synclinal de Château-Thierry ainsi que trois axes de plis d'extension locale affectent la série du Tournaisien-Viséen. Une faille de charriage à pendage sud recoupe longitudinalement l'ensemble de cette structure. Celle-ci est reconnue en tant que faille de Chaleux dans la zone ouest et faille de Vêves dans la zone est. Le pendage sud de cette faille vérifie bien la vergence générale vers le nord de l'Allochtone ardennais, héritée de l'orogénèse hercynienne.

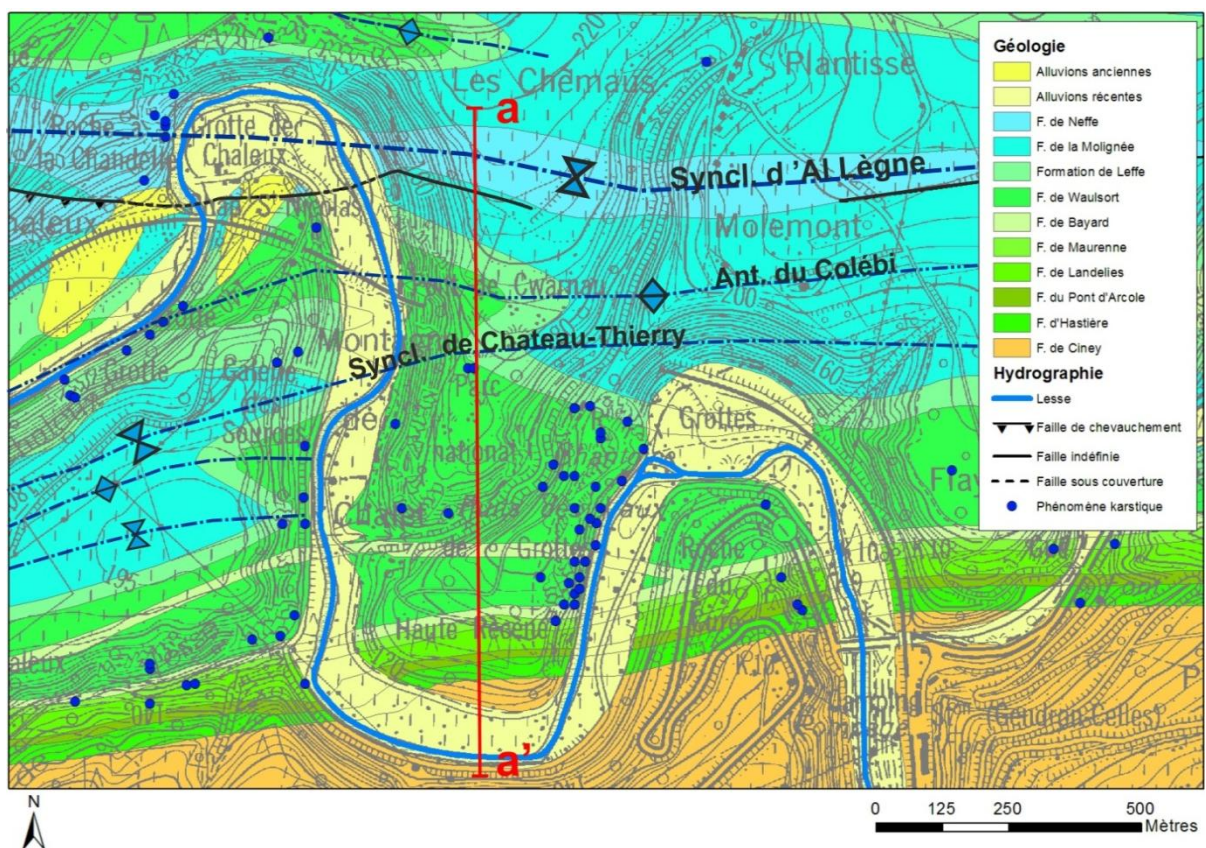


Figure II-6 : Localisation du site de Furfooz sur un extrait de la nouvelle carte géologique de Wallonie Hastière – Dinant (53/7-8) (Delcambre & Pingot, 1993).

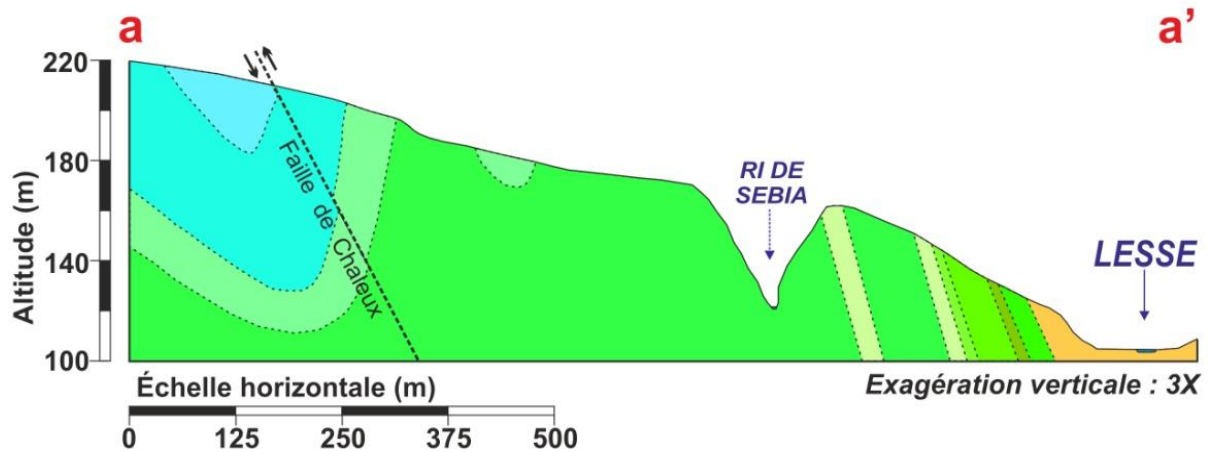


Figure II-7 : Coupe géologique a-a' au travers du massif de Furfooz.

III. Contexte hydrogéologique

III.1. Hydrologie régionale et locale

Le site de Furfooz est traversé d'est en ouest par la Lesse. Celle-ci s'écoule en provenance du substratum dévonien, au sud, et incise pour la première fois les unités carbonatées du Carbonifère au niveau des méandres de Furfooz. Au niveau de la zone d'étude, la Lesse possède trois affluents principaux (**Figure III-1**) :

- Le Ruisseau de la Fontaine Saint-Hadelin ;
- Le Ri des Vesses ;
- Le Ri de Sébia.

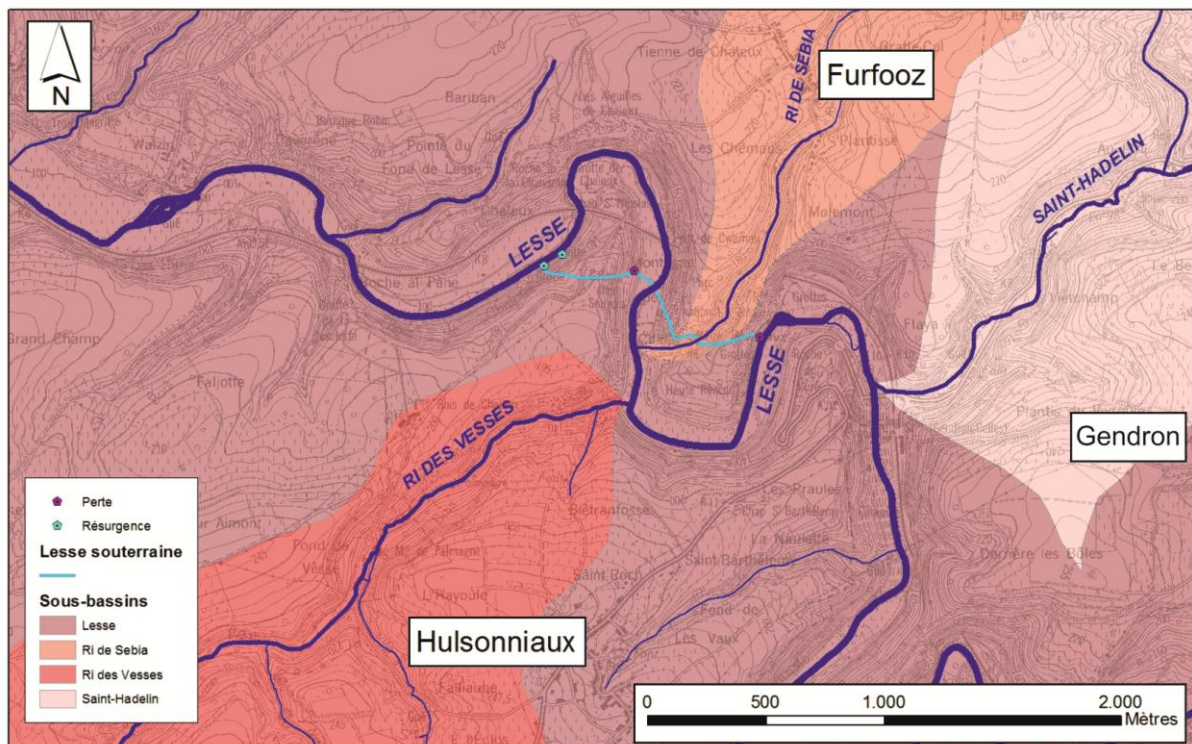


Figure III-1 : Réseau hydrologique et sous-bassins versants de la région de Furfooz.

Le bassin versant du Ruisseau de la Fontaine Saint-Hadelin (superficie de 30,5 km²) constitue un exemple-type du relief condruzien. Il est constitué d'un ruisseau principal s'écoulant au sein d'un synclinal calcaire et alimenté par une série d'affluents s'écoulant depuis les crêtes situées au droit d'anticlinaux gréseux. Bien qu'étant affecté de nombreux phénomènes karstiques, ce bassin versant n'a pas été étudié dans le cadre de ce travail.

Le Ri des Vesses s'écoule vers le nord depuis le massif schisto-gréseux famennien. Sa partie aval, au droit des calcaires carbonifères, est marquée de nombreuses pertes diffuses entraînant un assèchement du ruisseau durant les périodes d'étiage.

Le Ri de Sébia prend sa source au nord, au niveau du village de Furfooz. Le cours de ce ruisseau est marqué par une série de pertes diffuses au sein des formations carbonatées. Au niveau de son passage au droit du premier recoupement de méandre de la Lesse, de nombreuses pertes indiquent un écoulement probable vers le réseau souterrain.

III.2. Caractérisation des formations géologiques d'un point de vue hydrogéologique

On distingue trois types de formations dans la zone de Furfooz qui se distinguent par leurs caractéristiques hydrogéologiques (**Figure III-2**) :

- les formations calcaires, toutes datées du Carbonifère, dont la porosité de fracture et la conductivité hydraulique (perméabilité) sont importantes. Il s'agit des formations d'Hastière, Landelies, Bayard, Waulsort, Leffe, Molinee et Neffe. La plupart présentent des manifestations importantes de phénomènes karstiques ;
- les formations argileuses ou argilo-calcaires du Pont d'Arcole et de Maurenne, moins perméables ;
- les formations gréseuses du Dévonien, représentées par le sommet de la formation de Ciney (calco-gréseux). Celle-ci peut être fortement fracturée et altérée sur les sommets topographiques et présenter de ce fait une bonne porosité et une bonne perméabilité.

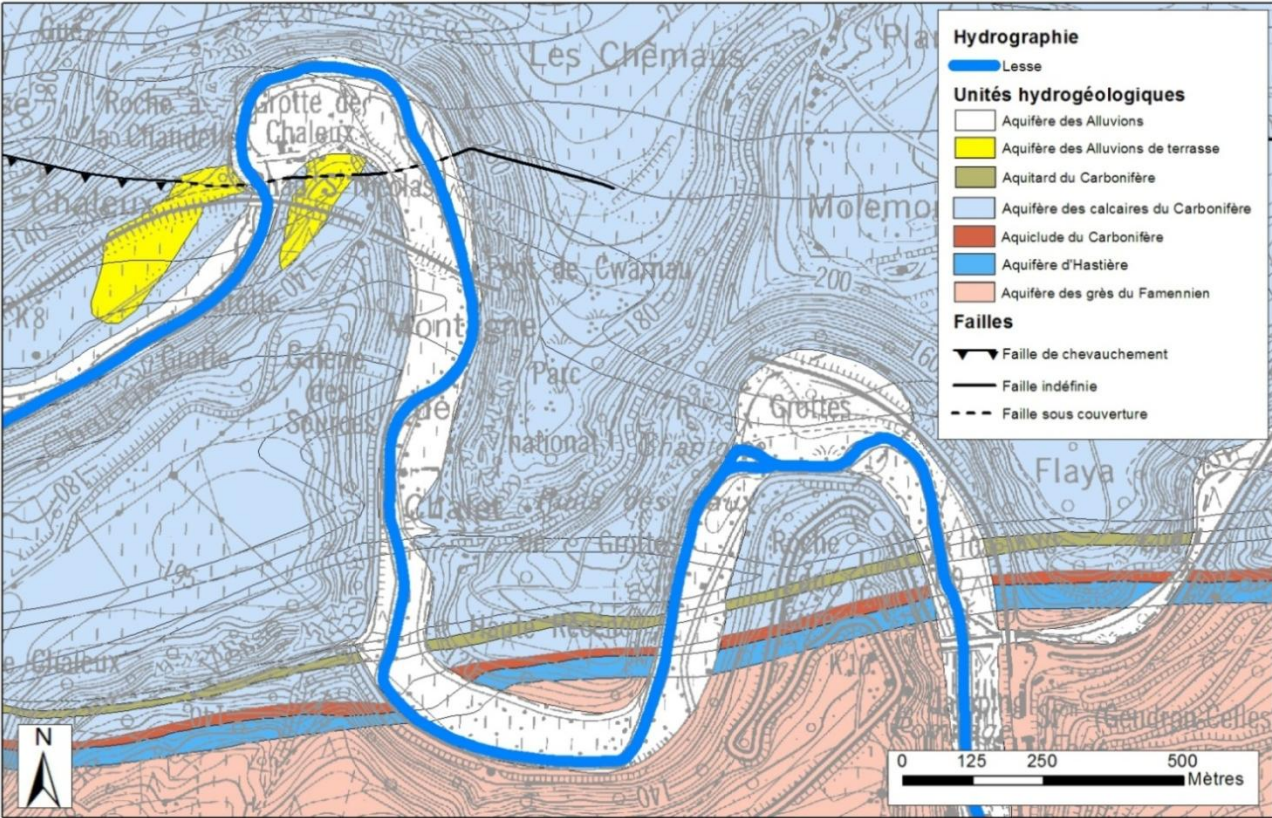
Nogarède et al. (2003) ont regroupé ces formations à partir de leurs caractéristiques hydrogéologiques sous les termes d'aquifère, aquitard ou aquiclude.

- L'aquifère est une formation perméable permettant d'exploiter de grandes quantités d'eau souterraine.
- L'aquitard est une formation semi-perméable dans laquelle l'écoulement se fait à une vitesse plus réduite que dans un aquifère. Elle présente un potentiel d'exploitation plus limité.
- L'aquiclude est une formation à caractère imperméable dans laquelle l'exploitation est économiquement impossible.

La Formation de Ciney est reprise sous le terme d'Aquifère du Famennien. En effet, l'altération des grès au droit des crêtes topographiques forme une série d'aquifères sous forme de nappes, dites, de « manteau d'altération ». Ces nappes sont de capacité réduite, étant donné qu'elles se limitent à la partie superficielle, altérée et fracturée, de la formation. Le résidu d'altération qui forme ces aquifères procure au réservoir une importante porosité de pores combinée à une porosité de fracture, en raison de la fracturation sous-jacente. Cette fracturation engendre également une bonne perméabilité, rendant possible l'exploitation de ces nappes locales.

Les formations calcaires du Carbonifère présentent de grandes potentialités en termes de ressources en eau et sont donc fréquemment exploitées. La Formation d'Hastière représente un aquifère, probablement en relation avec l'aquifère calco-gréseux de la formation de Ciney. Son sommet est limité par les shales de la formation du Pont d'Arcole, formation imperméable reprise sous le terme d'unité aquiclude du Carbonifère. Cette formation représente donc une barrière hydrogéologique à l'échelle locale, compartimentant les aquifères du Carbonifère.

La base de l'aquifère principal du Carbonifère est située dans la formation de Landelies qui est séparée du reste de l'aquifère par la Formation de Maurenne. Cette dernière se distingue de ses voisines par une plus grande teneur en matières non carbonatées (environ 30 % ; Nogarède et al., 2003). Elle a donc été considérée comme une formation aquitard. D'après Nogarède et al. (2003), il n'existe pas d'indication montrant un compartimentage de l'aquifère développé dans les calcaires de la Formation de Landelies par rapport aux calcaires des autres formations de l'Ivorien, du Moliniacien et du Livien. Pour cette raison, la Formation de Landelies et les formations de l'Ivorien, du Moliniacien et du Livien forment une seule unité hydrogéologique, dont l'épaisseur totale avoisine 500 mètres. Les autres formations comprises dans la région de Furfooz, à savoir Bayard, Waulsort, Leffe, Molinee et Neffe, appartiennent donc à l'unité aquifère du Carbonifère.



ÈRE	SYST.	SÉRIE	ÉTAGE	FORMATION	UNITÉ HYDROGÉOLOGIQUE
PALÉOZOÏQUE	CARBONIFÈRE	VISÉEN	MOLINIACIEN	NEFFE	Aquifère des calcaires du Carbonifère
				MOLIGNÉE	
				LEFFE	
				WAULSORT	
				BAYARD	
		TOURNAISIEN	IVOIRIEN	MAURENNE	Aquitard du Carb.
				LANDELIES	Aquifère du Carb.
				PONT d'ARCOLE	Aquiclude du Carb.
		HASTARIEN	HASTARIEN	HASTIÈRE	Aquifère d'Hastière
				CINEY	Aquifère des Grès du Famennien
DÉVONIEN	DÉVONIEN SUPÉRIEUR	FAMENNIEN			

Figure III-2 : Extrait de la carte hydrogéologique de Wallonie Hastière-Dinant (53/7-8) et log stratigraphique reprenant les unités hydrogéologiques affleurantes au sein du massif de Furfooz et leur correspondance géologique (Nogarède et al., 2003 – modifié).

Partie 2 : Description et conditions hydrogéologiques de la Lesse souterraine de Furfooz

I. Description du réseau karstique de la Lesse souterraine de Furfooz

I.1. Généralités et topographie des principaux réseaux

Le réseau karstique de la Lesse souterraine de Furfooz est un système de type perte-résurgence par recoupement souterrain de méandre. Ce système est de même type que celui présent à Han-sur-Lesse et qui a formé le réseau souterrain de la Lesse au sein du massif de Boine (Bonniver, 2011). Bien que de moindre ampleur que la grotte de Han, il présente cependant un tracé souterrain de la Lesse de plus d'un kilomètre ainsi que la particularité de constituer un double recoupement de méandre (**Figure I-2** et **Figure I-10**). Tout au long de ce tracé, différents points permettent un regard sur la Lesse souterraine, ce qui offre une opportunité d'étude tout à fait intéressante dans le domaine de l'hydrogéologie des systèmes karstiques actifs.

Les principales zones d'intérêt sont déjà décrites au début du 20^e siècle par Vandebroek, Martel et Rahir qui parlent déjà d'un double recoupement souterrain de méandre et dressent un tracé hypothétique pour le cours d'eau souterrain (**Figure I-1** ; Vandebroek et al., 1910).

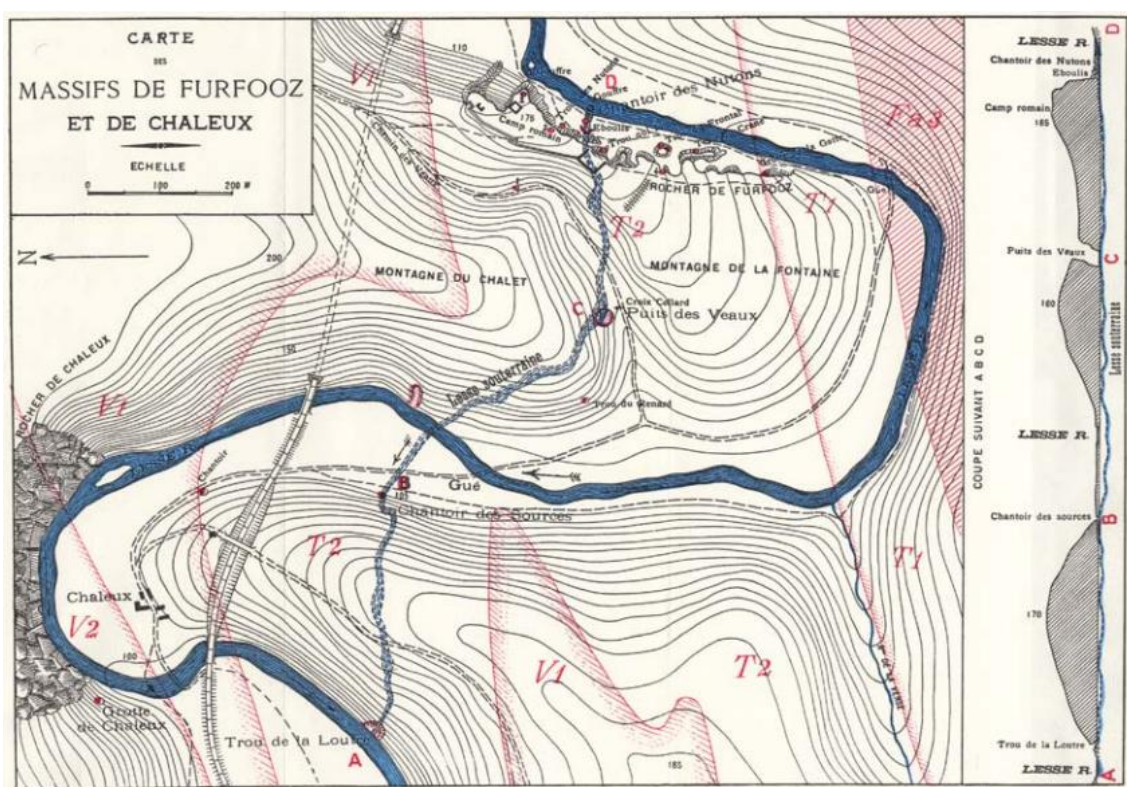


Figure I-1 : La double boucle de la Lesse, à Furfooz, traversée par la Rivière souterraine (Vandebroek et al., 1910).

Leurs conclusions sont principalement basées sur des observations faites à la perte principale (Chantoir des Nutons), au Puits des Vaux, à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre à partir d'essais de colorations à la fluorescéine (*cf. Chapitre II.5 : Historique des essais de traçage qualitatifs*).

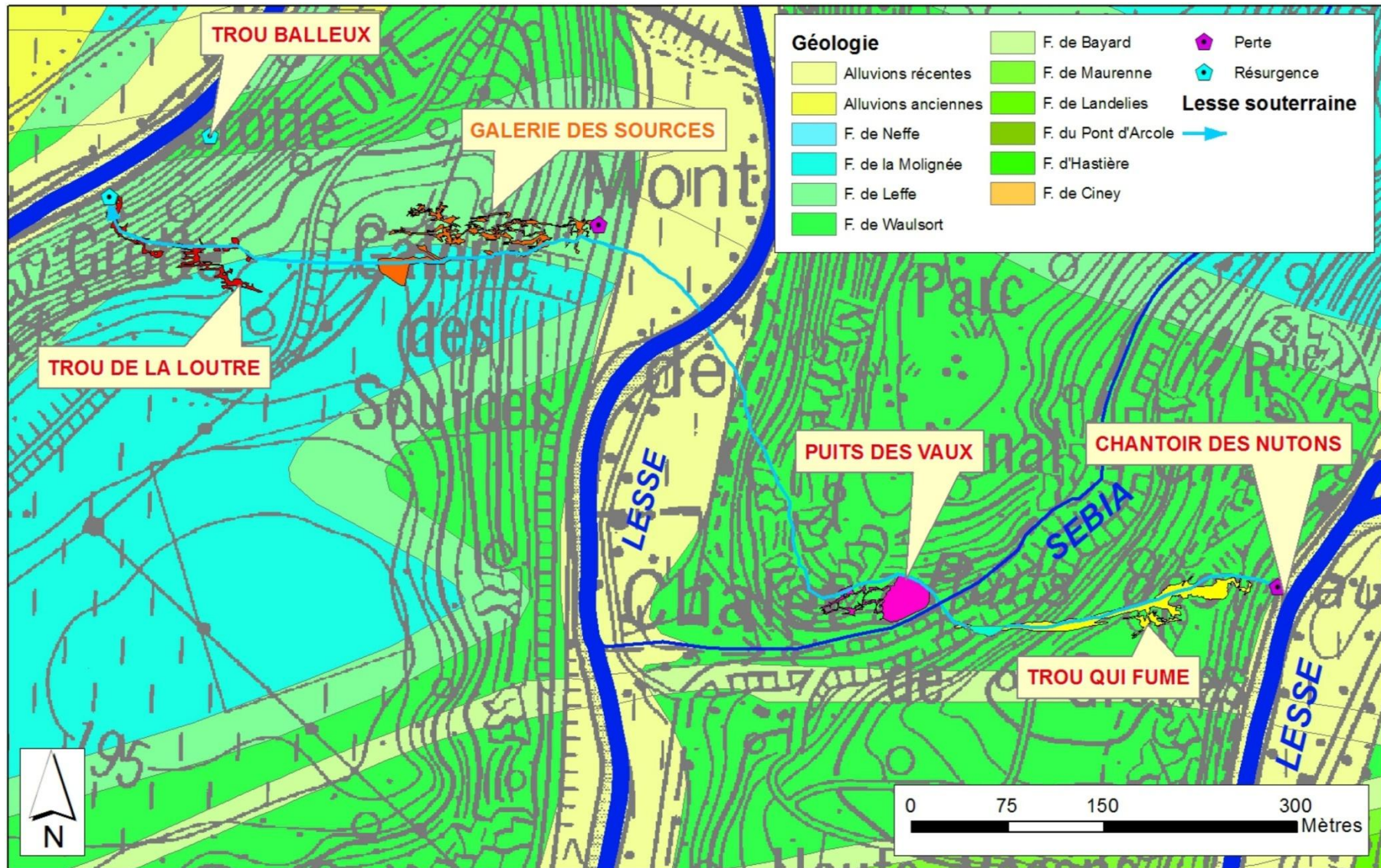


Figure I-2 : Réseaux karstiques formant le double recoupement de méandre de la Lesse à Furfooz.

I.1.1. Premier recouplement de méandre – Réseau est (*Figure I-4*)

Le cours souterrain de la Lesse débute au niveau d'une perte discrète en bordure de la Lesse aérienne, le *Chantoir des Nutons (NUT)* (*Figure I-3*). Cette perte n'est visible que lors des périodes de basses eaux. Après 80 mètres d'un trajet non pénétrable par l'homme, la Lesse souterraine est à nouveau observable sous forme d'une rivière souterraine au niveau de la galerie inférieure d'un vaste réseau karstique : le *Trou qui Fume (TQF)* (*Figure I-6*).



Figure I-3 : La Lesse aérienne s'engouffrant dans le Chantoir des Nutons – la flèche bleue représente le sens du courant de la Lesse aérienne, la flèche verte la direction de la perte (photo : G. Rochez).

Après s'être écoulée sur environ 130 mètres dans cette galerie (*Figure I-11*), elle vient alimenter un lac souterrain d'une quarantaine de mètres de long sur 10 mètres de large au maximum. Ce lac a été plongé par M. Pauwels (ESCM) en 2006, il se termine sur un passage étroit à -31 mètres qui se prolonge en direction du Puits des Vaux.

À environ 50 mètres à vol d'oiseau de ce lac souterrain, la Lesse souterraine est observable au fond du *Puits des Vaux (PDV)* (*Figure I-5*). Ce gouffre d'effondrement fait une trentaine de mètres de profondeur et le fond est occupé par un vaste plan d'eau (*Figure I-11*). Aucun courant n'y est visible, mais les traçages ont permis de prouver que l'eau s'engouffrant dans le siphon terminal du Trou qui Fume se retrouve au Puits des Vaux. Selon les rapports de plongée, ce plan d'eau est un vaste volume karstifié, apparaissant comme un système annexe au drain principal de la Lesse souterraine (J.B. Schram, communication personnelle).

Après son passage à proximité du Puits des Vaux, la Lesse souterraine entame le dernier tronçon de son premier recouplement de méandre, dans une direction probable nord-nord/ouest. Bien que cette zone regroupe un grand nombre de phénomènes karstiques remarquables, aucun n'a pu être mis en relation avec le cours souterrain de la Lesse. Le tracé exact reste donc inconnu.

Finalement, la Lesse souterraine passe au-dessous du tracé aérien pour venir rejoindre le premier point d'observation appartenant au second recouplement de méandre : la *Galerie des Sources (GDS)*.

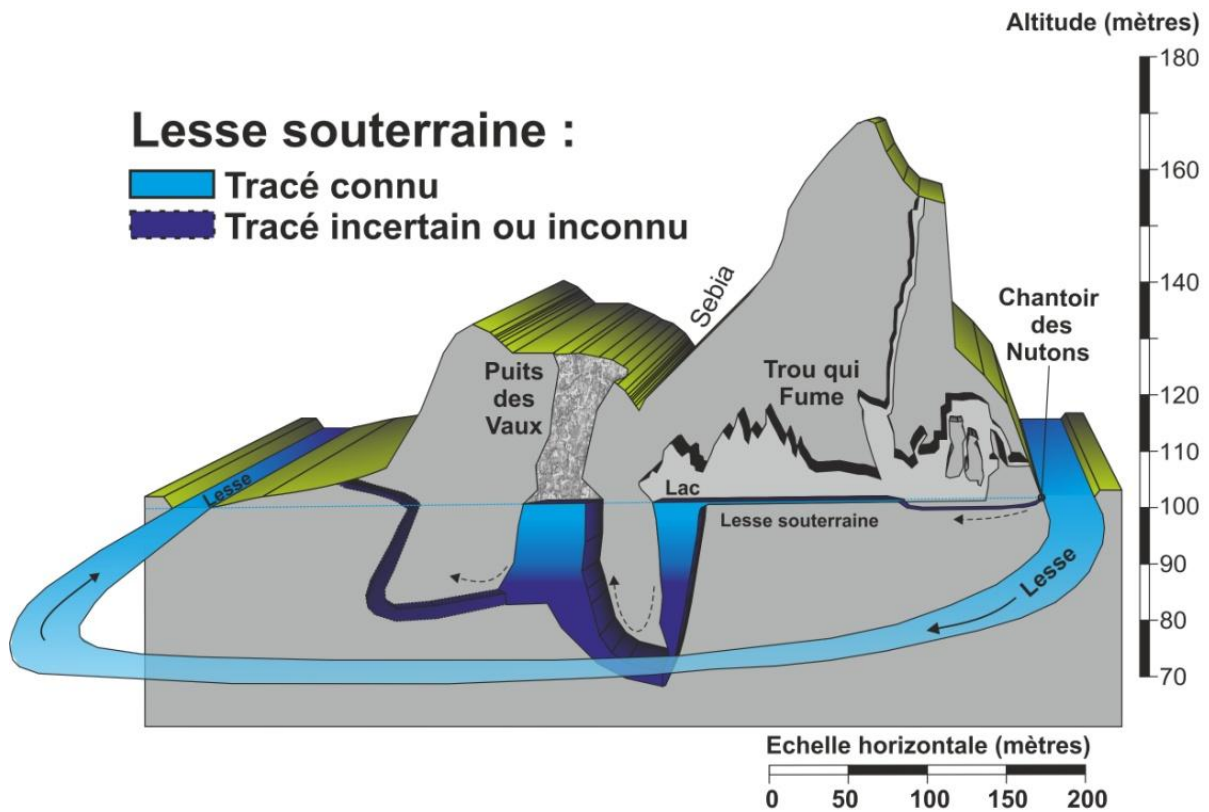


Figure I-4 : Vue schématique du réseau est de la Lesse souterraine de Furfooz.

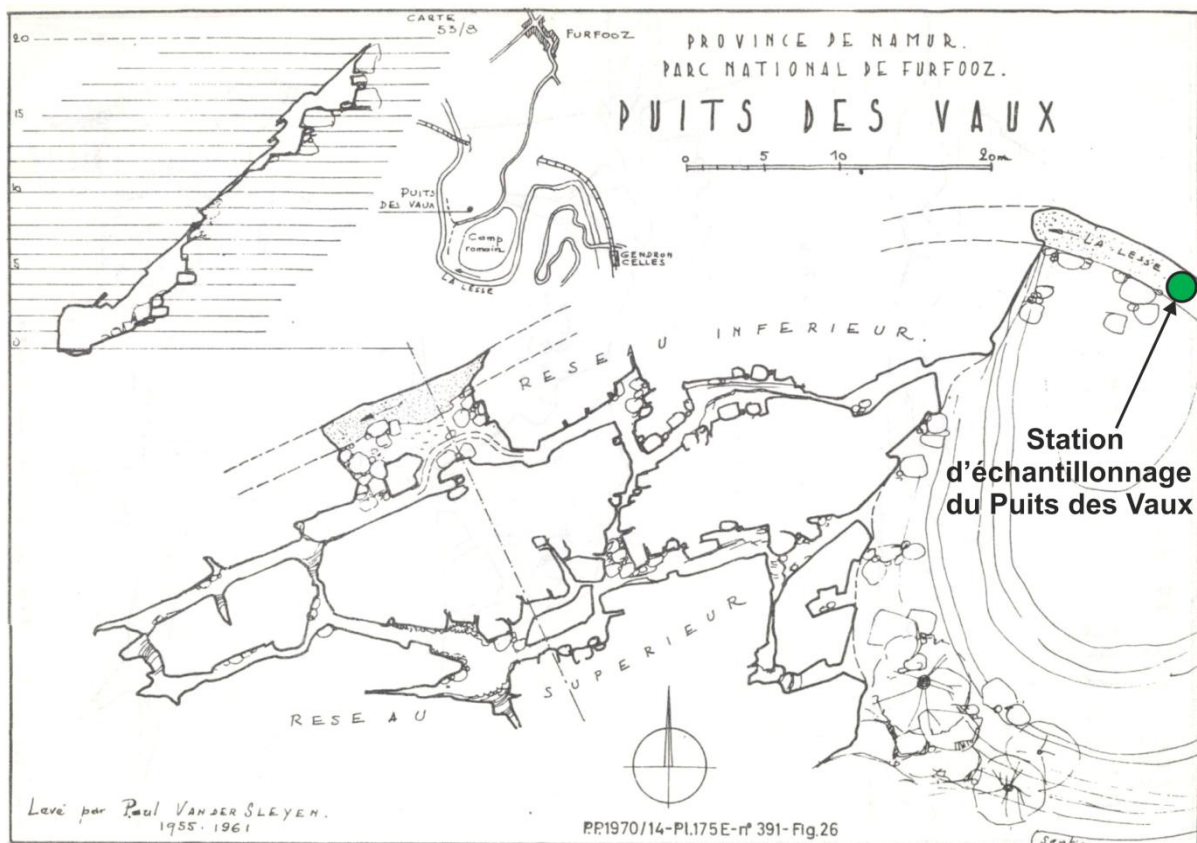


Figure I-5 : Topographie du Puits des Vaux (Van der Sleyen, 1961).

Référence Atlas du Karst Wallon (AKWA): 538-242a
 Site classé par Arrêté Royal du 18 juillet 1980
 Statut de Protection ResNat 6807 (Ministère de la Région Wallonne)
 Site de SGB (Site de Grand Intérêt Biologique) n° 2265
 Site Classé CSIS (Cavité Souterraine d'Intérêt Scientifique) depuis 13 février 1999

Historique de la Topographie:

12/1954: P.Vander Sleyen, D.Demartynoff
 10/1962-02/1963: SCUCL
 (M. Coen, H. Maréchal, A. & J. Robeyns, J.-P. Descheemackers, M. Rzaad, P. Engels, E. Rosés, J. Lecomte, S. Couteaux, J.-C. Devroye, plan dressé par P.Vander Sleyen)
 04/2006-07/2007: Groupe des Recherches Spéléologiques Interclub Hades
 (E. Van den Broeck, M. Van der Meirsch, J. Hosselet, S. Lamesch, J.-P. Bartholeyns, E. Maerivoet, F. Vandepierre, R. Vanstaeyen, D. Verschueren, F. Meert, G. Dekeyser, J. Lefebvre)

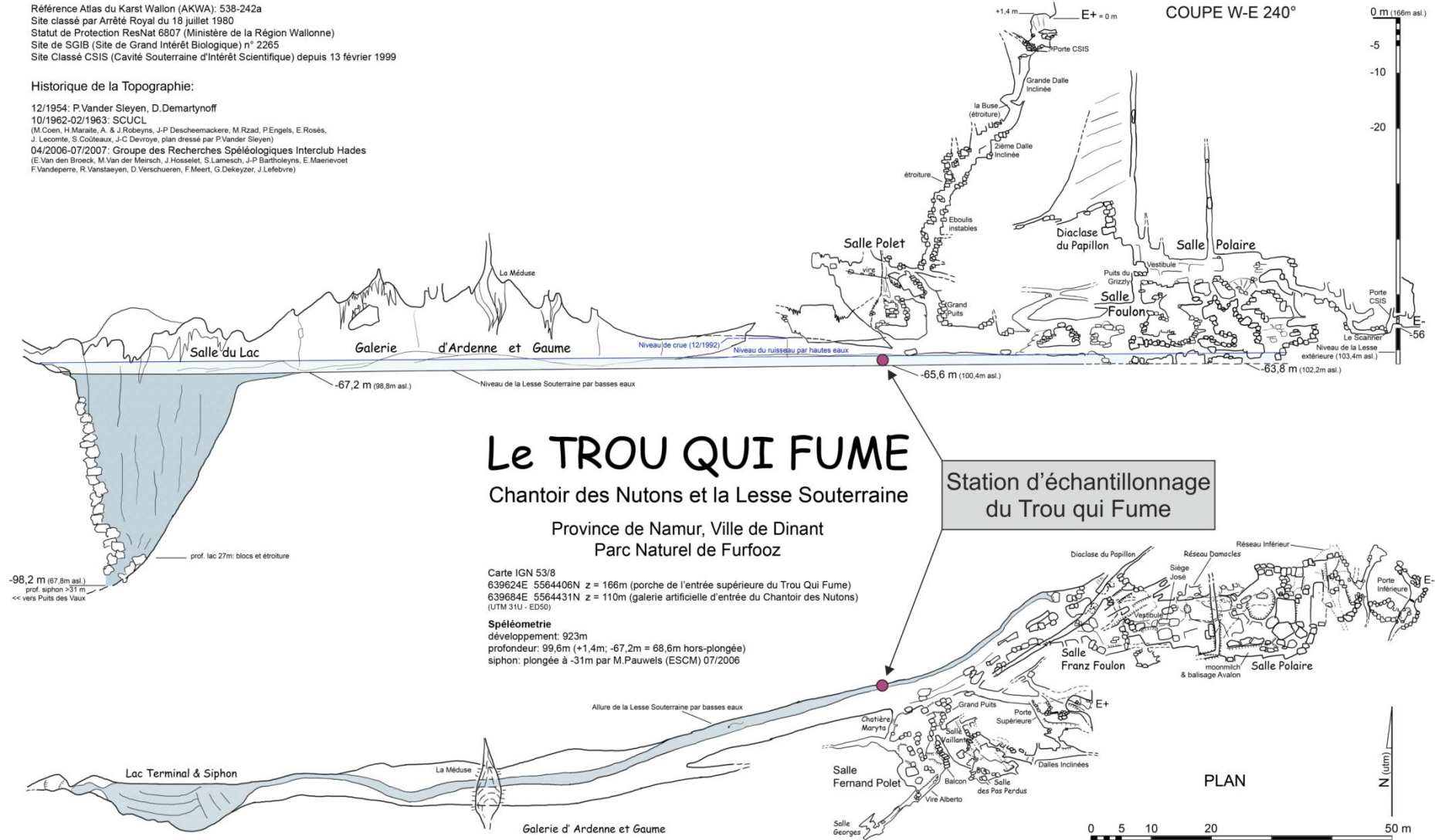


Figure I-6 : Topographie du Trou qui Fume (Groupe des recherches spéléologiques interclub Hadès, 2007).

I.1.2. Second recoupement de méandre – Réseau ouest (Figure I-7)

Le premier point d'observation de la Lesse souterraine, au niveau du second recoupement de méandre, est la *Galerie des Sources (GDS; Figure I-9)*, en rive gauche de la Lesse aérienne. Deux résurgences de la rivière souterraine se trouvent à l'extrême est de cette vaste grotte dont le niveau inférieur est partiellement noyé (*Figure I-11*). L'eau qui s'écoule provient du Puits des Vaux. Le tracé de la Lesse souterraine est alors connu sur presque 150 mètres vers l'ouest via le réseau supérieur fossile de la Galerie des Sources ou des récits de plongée (Van Es et al., 1992).

À l'extrême ouest de la Galerie des Sources, la Lesse souterraine emprunte un siphon au niveau de la Salle Kasper. Le tracé est alors inconnu sur un peu plus de 50 mètres et il est à nouveau observable à sa résurgence terminale principale, le *Trou de la Loutre (TDL; Figure I-8)*. Cette résurgence constitue un ensemble de galeries semi-noyées pénétrables sur environ 150 mètres en direction de la Galerie des Sources.

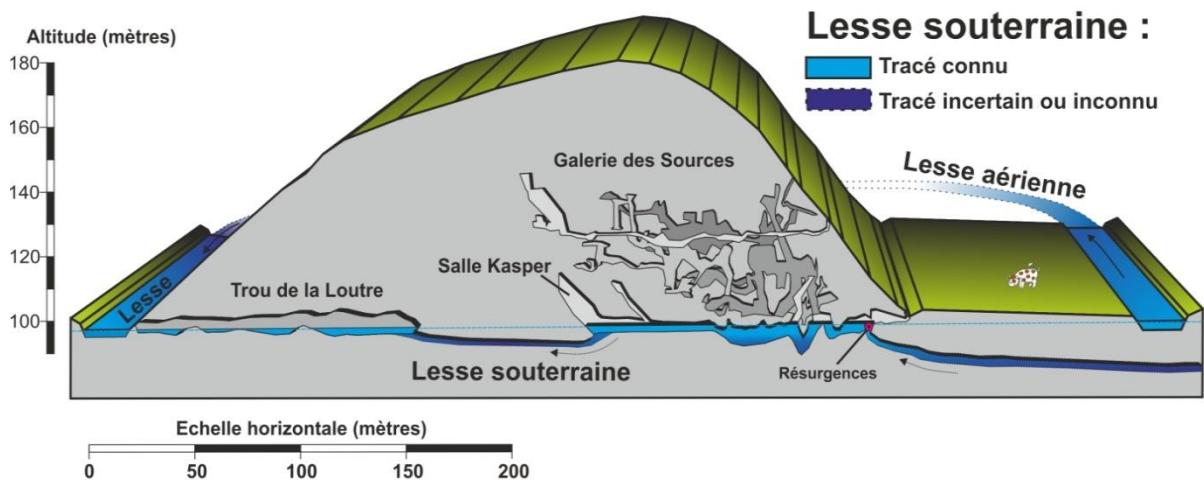


Figure I-7 : Vue schématique du réseau ouest de la Lesse souterraine de Furfooz.

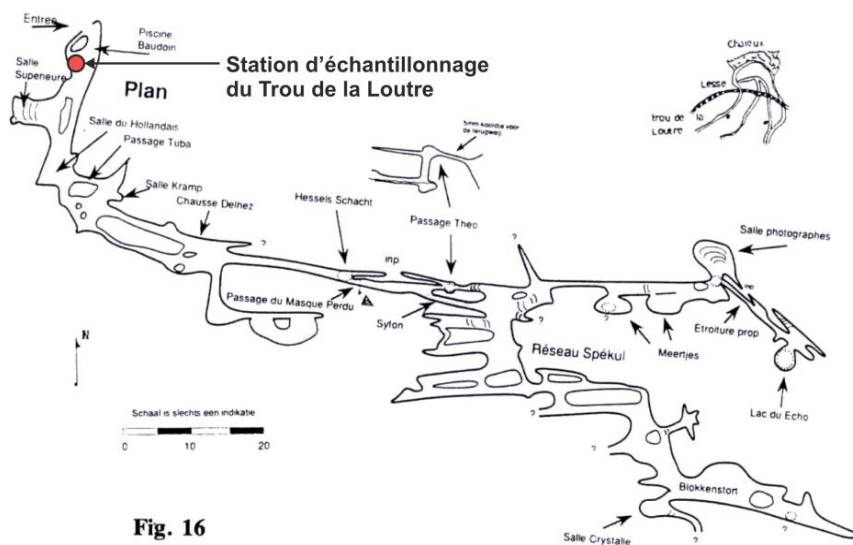


Fig. 16

PROVINCE DE NAMUR
COMMUNE DE HULSONNIAUX
TROU de la LOUTRE

Topo naar topo Spekul (1972) met uitbreidingen door Eric Walch, sept 1991

Figure I-8 : Topographie du Trou de la Loutre (Walch, 1991).

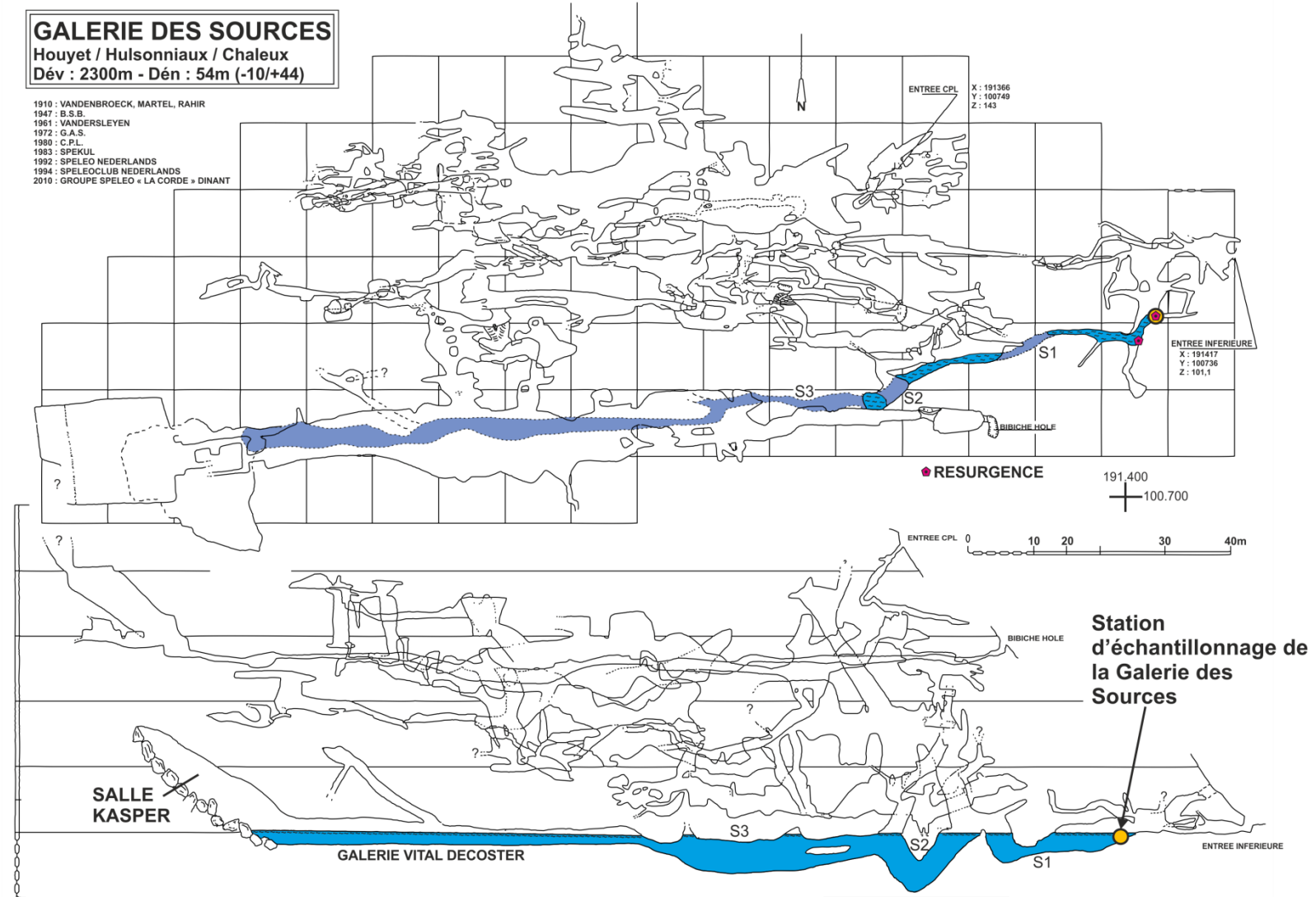


Figure I-9 : Topographie de la Galerie des Sources (GSCN, 2010 – modifié)

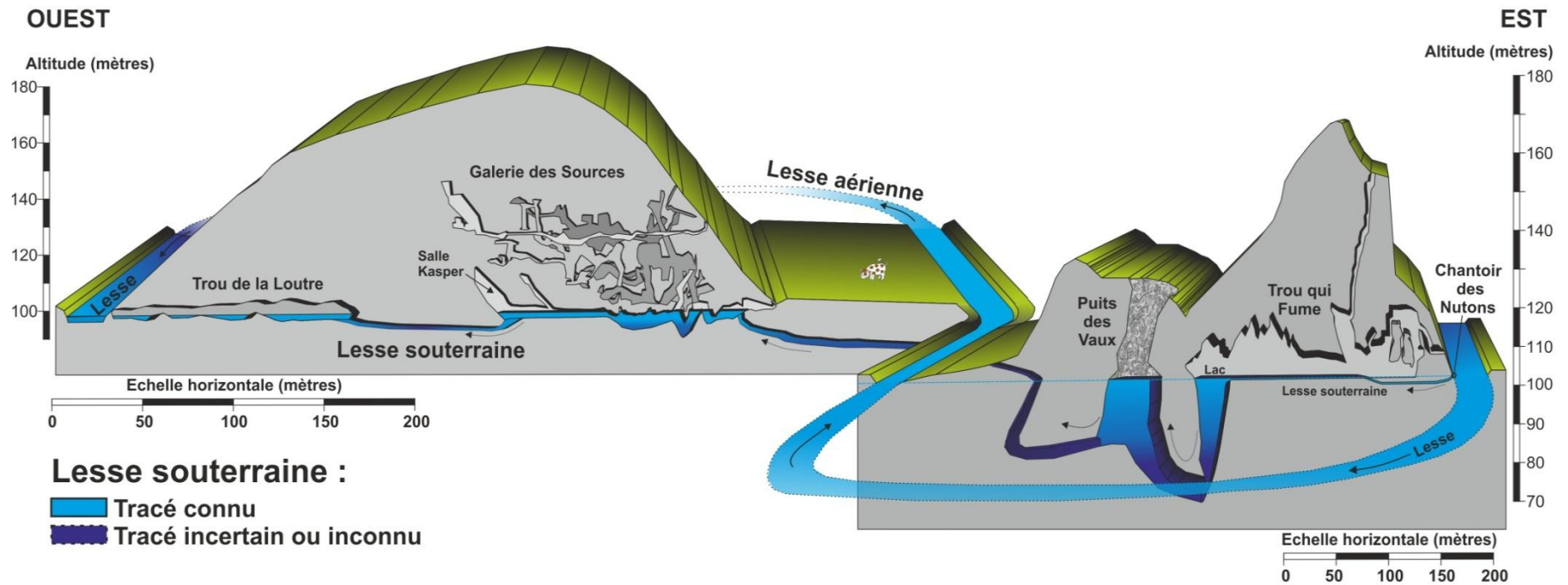


Figure I-10 : Vue en perspective du réseau de la Lesse souterraine de Furfooz.

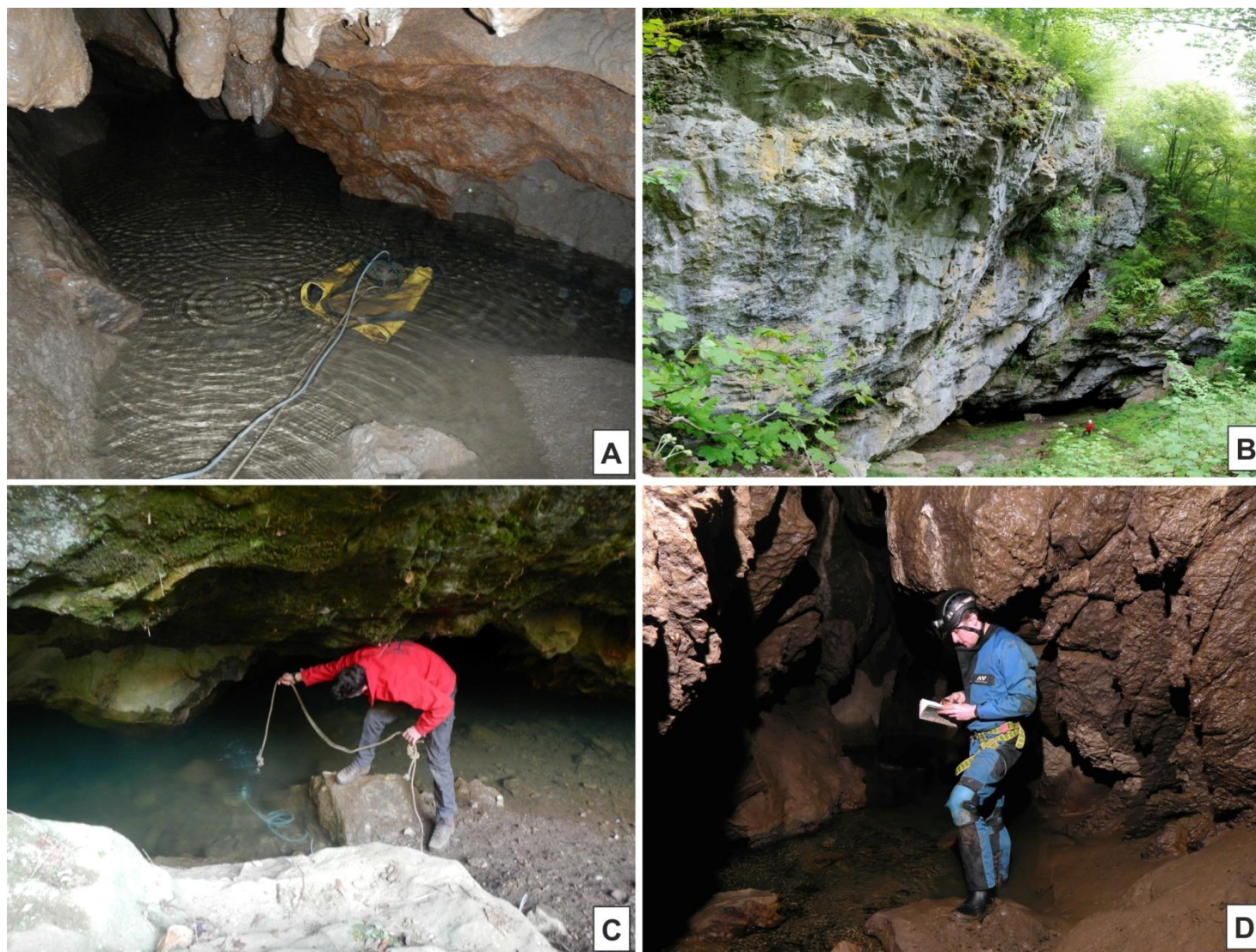


Figure I-11 : Photos de la Lesse souterraine – A. Rivière souterraine au Trou qui Fume, B. Vue générale du Puits des Vaux (photo : G. Rochez), C. Installation d'un fluorimètre de terrain dans l'étendue d'eau du Puits des Vaux, D. Rivière souterraine à la résurgence de la Galerie des Sources (photo : G. Rochez).

I.2. Utilisation de la géophysique dans la détection de phénomènes karstiques

Le tracé exact de la Lesse souterraine est incertain entre le Puits des Vaux et la résurgence de la rivière dans le niveau inférieur de la Galerie des Sources. Les essais de traçage menés entre ces deux points ont prouvé l'existence d'un conduit bien délimité dans lequel la convection est le phénomène de transport prédominant (*cf. Partie 3 : Essais de traçage*). Il pourrait donc être possible de détecter ce drain karstique, notamment à l'aide de méthodes géophysiques. Dans ce cadre, les tomographies électriques ont été choisies pour leur facilité de mise en œuvre. Trois profils ont été réalisés sur le trajet supposé de la Lesse souterraine (*Figure I-12*).

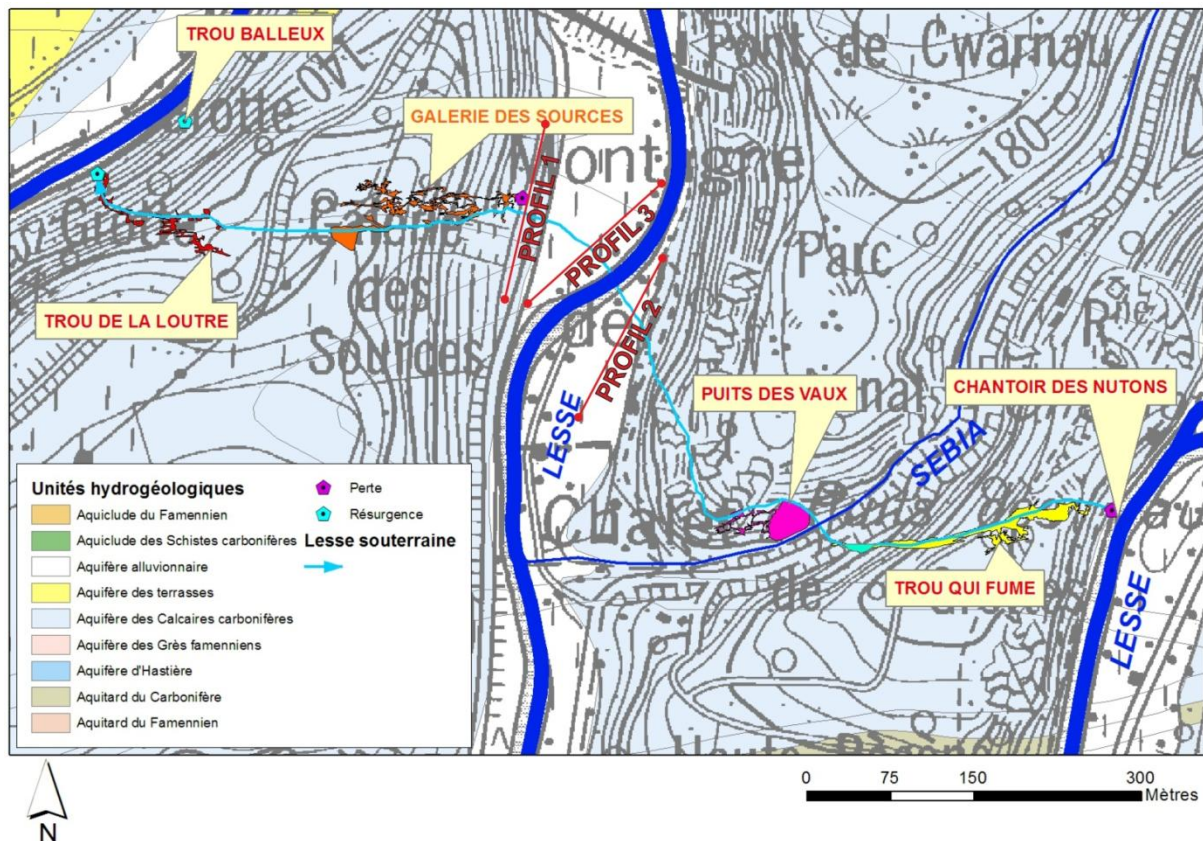


Figure I-12 : Localisation des trois profils de tomographie électrique.

I.2.1. Méthodologie de la tomographie électrique

La tomographie électrique est basée sur le principe du sondage électrique. Celui-ci consiste à injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes externes (A et B) et à mesurer la différence de potentiel induite entre une paire interne d'électrodes (C et D). (*Figure I-13*). À partir de l'intensité du courant injecté, I , de la différence de potentiel mesurée, ΔV , et de la géométrie du dispositif, on peut déterminer la résistivité électrique apparente du sous-sol via la loi d'Ohm (*équation 1*).

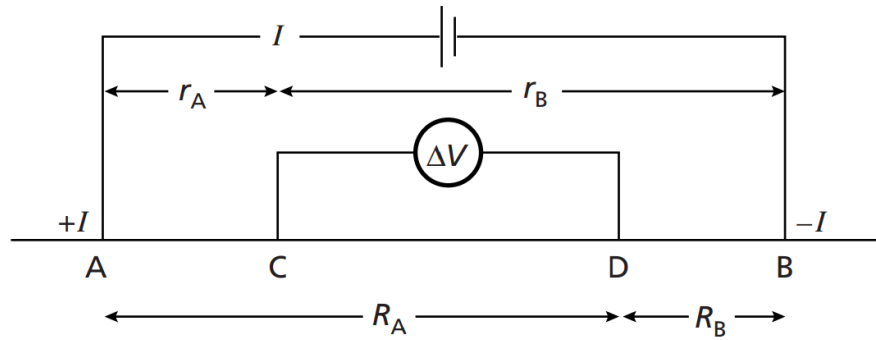


Figure I-13 : Configuration classique d'électrodes utilisée dans les mesures de résistivité électrique (Kearey et al., 2002).

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I \left\{ \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right) - \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \right\}} = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Où :

- P - Résistivité électrique [ohm.m] ;
- K - Facteur de correction géométrique [m] ;
- ΔV - Différence de potentiel [volts] ;
- I - Intensité [ampères].

La résistivité électrique représente la résistance d'un matériel au passage du courant. C'est une variable physique dépendant de nombreux facteurs. Dans le cas des sols et des roches, cette résistivité dépendra principalement de la présence de minéraux conducteurs, de porosité et d'un éventuel fluide conducteur (Kearey et al., 2002). Vu les recouvrements de gammes de résistivités entre la plupart des lithologies courantes, il n'est pas possible de déterminer avec certitude la lithologie. Cependant, il est possible d'identifier des contrastes de résistivité indiquant des changements lithologiques ou structuraux.

Bien que de nombreuses configurations d'électrodes existent, seulement deux sont utilisées communément : le dispositif Wenner et le dispositif Schlumberger. Le dispositif Wenner est la méthode la plus simple puisque l'écartement entre les électrodes A, B, C et D est constant – $[a]$. L'équation (1) devient donc (Kearey et al., 2002) :

$$\rho_a = 2\pi a \times \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

La tomographie électrique est entièrement basée sur ce principe, mais comprend un dispositif de 64 électrodes alignées et équidistantes. Celles-ci sont reliées à un résistivimètre et à un ordinateur (Figure I-14). Le logiciel va choisir successivement des ensembles de 4 électrodes équidistantes parmi les 64 et mesurer la résistivité. À mesure de l'avancement du sondage, le logiciel choisit des électrodes de plus en plus éloignées (mais toujours équidistantes d'un multiple de $[a]$, pour mesurer la résistivité plus en profondeur. L'appareil va ainsi mesurer la résistivité selon des tranches de profondeur successives jusqu'à une profondeur maximale d'environ 1/5 de la longueur totale du dispositif. Le profil tomographique réalisé en surface permet d'obtenir une « image électrique » du sous-sol,

c'est-à-dire une coupe de la résistivité en fonction de la profondeur, mesurée pour différentes combinaisons d'électrodes de courant et de potentiel.

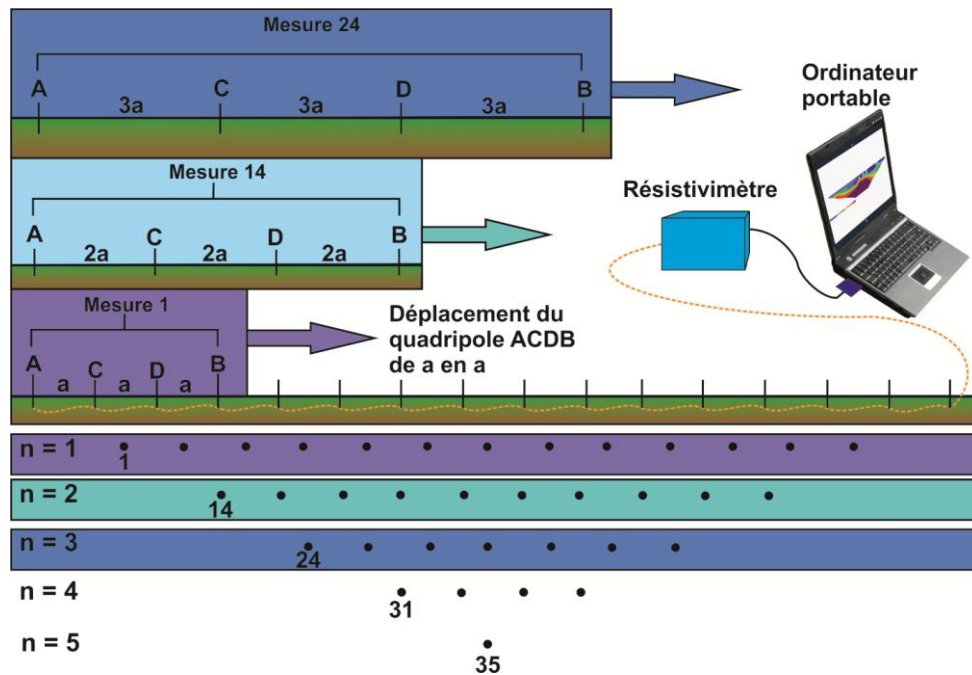


Figure I-14 : Schéma du fonctionnement de la tomographie électrique.

L'image obtenue à la fin de l'enregistrement n'est pas le résultat final. C'est une pseudo-section qui représente la résistivité apparente du terrain à l'endroit en question. Pour obtenir l'image finale, il faut réaliser une inversion via le programme RES2DINV (Geotomo Software). Celui-ci va générer une image en résistivités vraies aussi représentative que possible du sous-sol en fonction des mesures de résistivité apparentes qui ont été enregistrées (Rentier, 2002).

I.2.2. Résultats et discussion des profils géophysiques

I.2.2.1. Profil 1 (Figure I-15)

Sur ce profil, on distingue très nettement deux entités séparées par une bande de transition en termes de résistivité. De haut en bas se trouvent une zone de faible résistivité (25 à 200 ohm.m) et une zone de haute résistivité (1000 à plus de 3000 ohm.m).

La première zone représente la couche d'alluvions, formant le lit majeur de la Lesse. Son épaisseur varie de 5 à 10 mètres, ce qui semble cohérent. La seconde zone correspond aux calcaires de la Formation de Leffe. Ceux-ci sont vraisemblablement fracturés et altérés dans leur partie superficielle, ce qui correspond à la bande de transition observée.

Au centre du profil, une zone de plus faible résistivité indique un changement au niveau des calcaires. Il peut s'agir d'une zone alluvionnaire plus épaisse, présentant des résistivités plus élevées que celles en surface. Il peut également être question d'un phénomène de fracturation et/ou d'altération au niveau des calcaires. Bien que la position semble en adéquation avec le passage supposé du drain souterrain, rien ne permet d'affirmer qu'il s'agit effectivement de la Lesse souterraine.

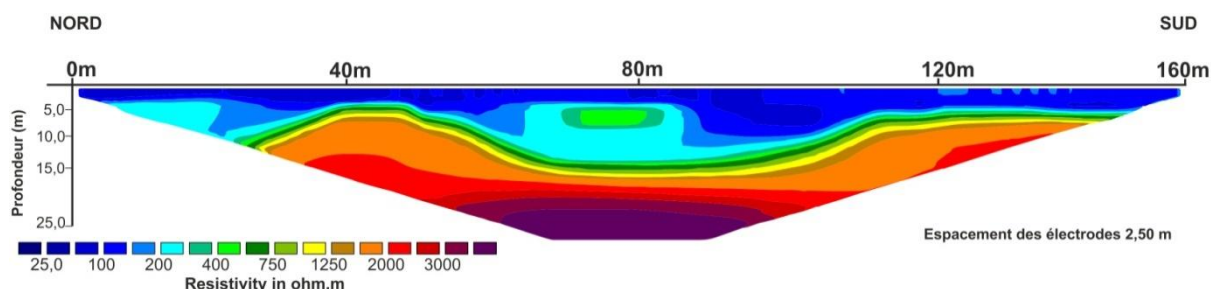


Figure I-15 : Profil de tomographie électrique n°1.

I.2.2.2. Profil 2 (Figure I-16)

Le profil 2 montre un canevas identique au premier. La couche d'alluvions varie également de 5 à 10 mètres, avec une tendance logique à l'épaississement vers le centre du lit alluvionnaire de la Lesse. Par-dessous, on retrouve les calcaires de la Formation de Waulsort. Aucune anomalie particulière pouvant indiquer un drain karstique n'est à signaler.

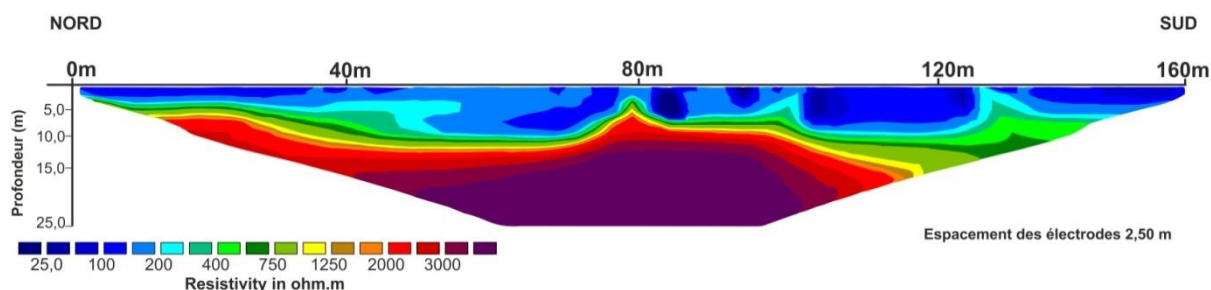


Figure I-16 : Profil de tomographie électrique n°2.

I.2.2.3. Profil 3

Le profil 3 réalisé, proche du profil 1, n'a pas donné de résultats en raison d'une défaillance de la bobine de câble servant à relier les électrodes au résistivimètre. Ce faisant, une part importante des données de résistivité ont été soit faussées, soit non mesurées.

I.2.3. Conclusions de la prospection géophysique

Bien que les deux profils réalisés aient permis de distinguer avec évidence la couche alluvionnaire des calcaires sous-jacents, la méthode utilisée semble inadaptée pour la détection de phénomènes karstiques. La précision et la résolution des mesures est, sans aucun doute, trop faible pour permettre la détection d'un drain de taille si réduite. Outre la méthode, les informations à propos du drain karstique hypothétique sont quasi inexistantes. Cette zone d'écoulement est peut-être située dans un autre secteur ou plus profondément. D'autres méthodes pourraient être envisagées pour tenter de détecter la présence de la Lesse souterraine. Les techniques de gravimétrie de précision semblent plus adaptées pour réaliser ce genre d'investigations.

II. Conditions hydrogéologiques

II.1. Introduction

Afin d'étudier au mieux le comportement hydrogéologique de la Lesse souterraine du site de Furfooz, un important dispositif instrumental et expérimental a été mis en place à partir d'avril 2012. D'une part, un monitoring complet du système a été réalisé. Celui-ci a consisté en la mise en place de différentes stations le long du cours souterrain de la Lesse afin d'établir une série de chroniques. Ainsi, les niveaux limnimétriques, les températures et les conductivités des eaux ont été mesurés en permanence. D'autre part, des mesures de débits ont été réalisées ponctuellement à la Galerie des Sources dans le but d'établir une chronique de débit à cette station et de la comparer avec celle de la Lesse aérienne. Toutes ces données seront présentées et commentées dans ce chapitre. En fin de chapitre, les résultats des principaux traçages historiques seront brièvement passés en revue. Ceci permettra d'avoir un premier aperçu des travaux réalisés sur le site et des durées de transit dans le système d'écoulement souterrain qui a été décrit au chapitre précédent.

II.2. Dispositif de mesures

II.2.1. Paramètres météorologiques extérieurs

Une sonde Mini-Diver (pression atmosphérique et température) a été placée à proximité de la Galerie des Sources (**Figure II-1**) afin de mesurer les paramètres météorologiques de la zone d'étude. La pression atmosphérique est particulièrement importante puisqu'elle sert à corriger le niveau des sondes pressiométriques immergées afin de déterminer les niveaux d'eau aux différentes stations de mesures.

II.2.2. Paramètres hydrogéologiques du réseau

Cinq stations de mesures ont été mises en place sur le réseau de la Lesse souterraine (**Tableau II-1**, **Figure II-1**). Chacune de ces stations était équipée d'une sonde pressiométrique mesurant le niveau de l'eau ainsi que la température. Quatre de ces stations étaient en plus capables de mesurer la conductivité électrique de l'eau.

Localisation	Type de sonde	Hauteur d'eau	Température	Conductivité
Chantoir des Nutons	CTD - Diver	oui	oui	oui
Puits des Vaux	CTD - Diver	oui	oui	oui
Galerie des Sources	CTD - Diver	oui	oui	oui
Trou de la Loutre (interne)	CTD - Diver	oui	oui	oui
Trou de la Loutre (externe)	Mini-D	oui	oui	non

Tableau II-1 : Dispositif de mesures mis en place sur le réseau de la Lesse souterraine de Furfooz.

Ces stations de mesures constituaient pour la plupart des stations limnimétriques, c'est-à-dire qui enregistrent la fluctuation du niveau de l'eau mais sans l'associer à une mesure de débit. La raison principale de ce choix est la configuration du réseau souterrain de la Lesse, qui rend pratiquement impossible toute mesure régulière du débit.

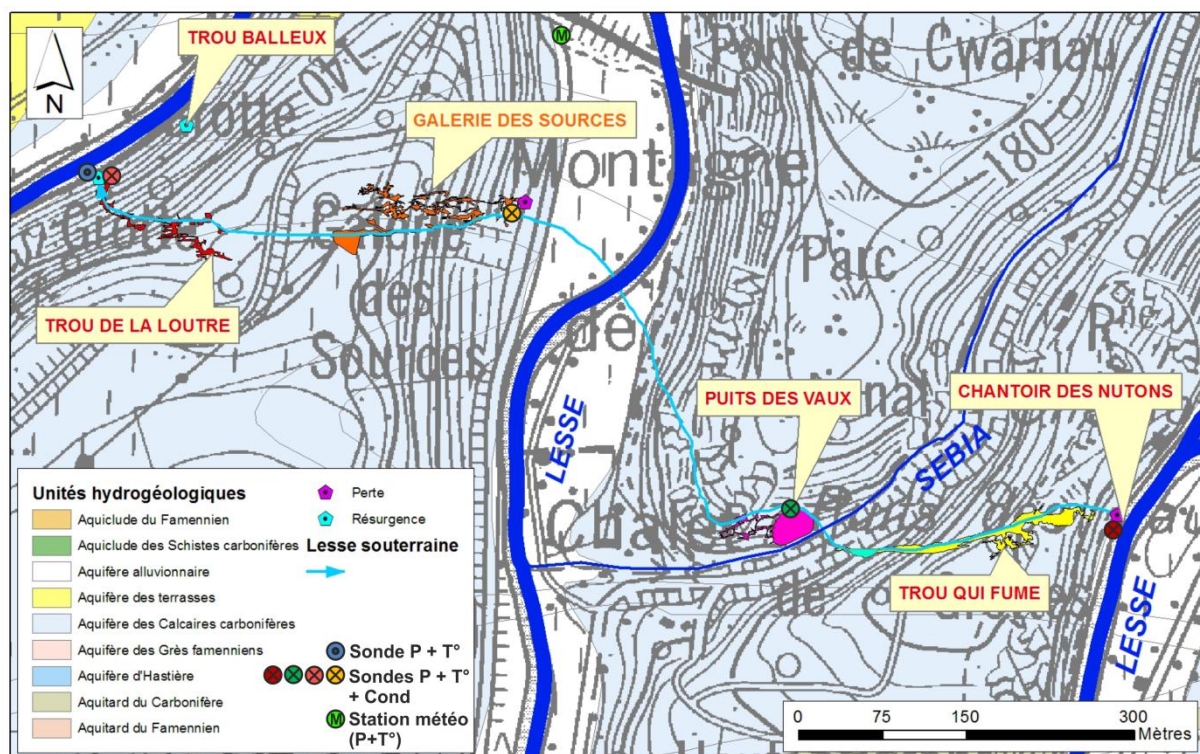


Figure II-1 : Localisation des stations de monitoring dans la zone d'étude – P : Pression, T° : Température, Cond : conductivité électrique.

Seule la station de la Galerie des Source présentait une configuration apte à la réalisation de mesures de jaugeage à l'aide d'un courantomètre Marsh-McBriney 2000. Ces mesures de jaugeage ont permis la réalisation d'une courbe de tarage et d'un hydrogramme. Compte tenu de la situation pratique et du fait qu'aucun affluent/diffluent majeur n'est présent tout au long du cours exploré de la Lesse souterraine, le débit de la Galerie des Sources a été considéré comme le débit moyen de l'ensemble du système. Une mesure en trois points du réseau, en août 2012, a d'ailleurs démontré cette constance du débit (4,0 l/sec au Chantoir des Nutons, 4,7 l/sec au Trou qui Fume et 4,5 l/sec à la Galerie des Sources). Toute l'analyse et principalement les modélisations du réseau se sont basées sur le postulat d'un débit constant dans l'espace.

II.3. Conditions hydrologiques – Niveaux limnimétriques et débits

II.3.1. Niveaux limnimétriques

Cinq stations limnimétriques ont été mises en place le long du cours souterrain de la Lesse. Afin de pouvoir comparer les différentes stations en terme de différences de fluctuation du niveau d'eau, il était important de transformer les données en cotes altimétriques. Pour ce faire, un repère fixe sur chaque station a été topographié en Z à l'aide d'un GPS différentiel (GPS1200 – Leica Geosystem) et selon la situation, d'un théodolite et/ou d'un DistoX (outil de topographie spéléologique combinant un distancemètre laser Leica Disto A3 ainsi qu'une boussole/clinomètre électronique 3 axes). Les niveaux limnimétriques ont ensuite été étalonnés en Z par rapport à ce repère fixe (**Figure II-2**).

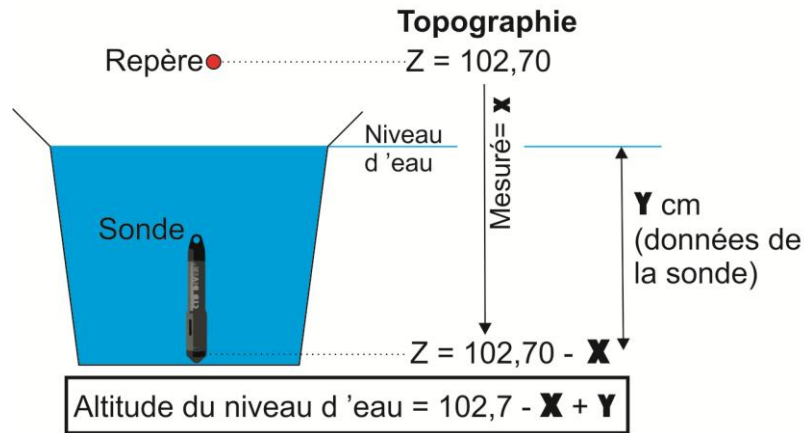


Figure II-2 : Méthode d'étalonnage en Z du niveau d'eau pour une station de mesure.

Les chroniques limnimétriques sur une année (**Figure II-3**) montrent certaines caractéristiques qui permettent d'évaluer le fonctionnement du système souterrain :

- Tous les sites montrent une réactivité rapide (1 à 5 h) aux fluctuations du niveau de la Lesse au Chantoir des Nutons, ce qui indique que le niveau limnimétrique de ces stations est imposé par le niveau de la Lesse à l'entrée du réseau.
- Le niveau d'eau au Puits des Vaux montre une moindre réactivité vis-à-vis du niveau de la Lesse aérienne. Ceci est particulièrement marqué lors des différents pics de crues qui sont régulièrement retardés de 5 à 10 heures et moins abrupts que ceux des stations situées plus en aval. Ce phénomène conforte l'idée selon laquelle le Puits des Vaux agirait plutôt comme un système annexe au drain principal, moins réactif.

En analysant les différences de niveaux d'eau entre les stations, il est possible de définir des comportements de hautes et basses eaux.

- En période de hautes eaux (octobre 2012 – avril 2013), les différences de niveau limnimétrique entre les stations sont faibles. Un resserrement des courbes est systématiquement observé lors des pics de crues. Ceci indique que le système s'équilibre lors de la montée du niveau d'eau, probablement en lien avec une montée du niveau piézométrique régional.
- En périodes de basses eaux (juin 2012 – octobre 2013), les différences sont plus significatives. De plus, à mesure qu'une sécheresse se prolonge, cette différence augmente (période d'étiage d'août – septembre 2012). Il semble que lorsque le niveau piézométrique régional diminue, il n'impose plus le niveau du système. Cela induit un gradient plus important entre l'entrée et la sortie du réseau souterrain.

La mise en place d'un monitoring du niveau piézométrique régional permettrait, sans doute, de mieux comprendre le comportement du réseau souterrain vis-à-vis du niveau régional de la nappe. L'acquisition de données limnimétriques sur plusieurs années s'avère également indispensable pour permettre de tirer des conclusions fiables à propos des tendances observées durant la période avril 2012 – mai 2013.

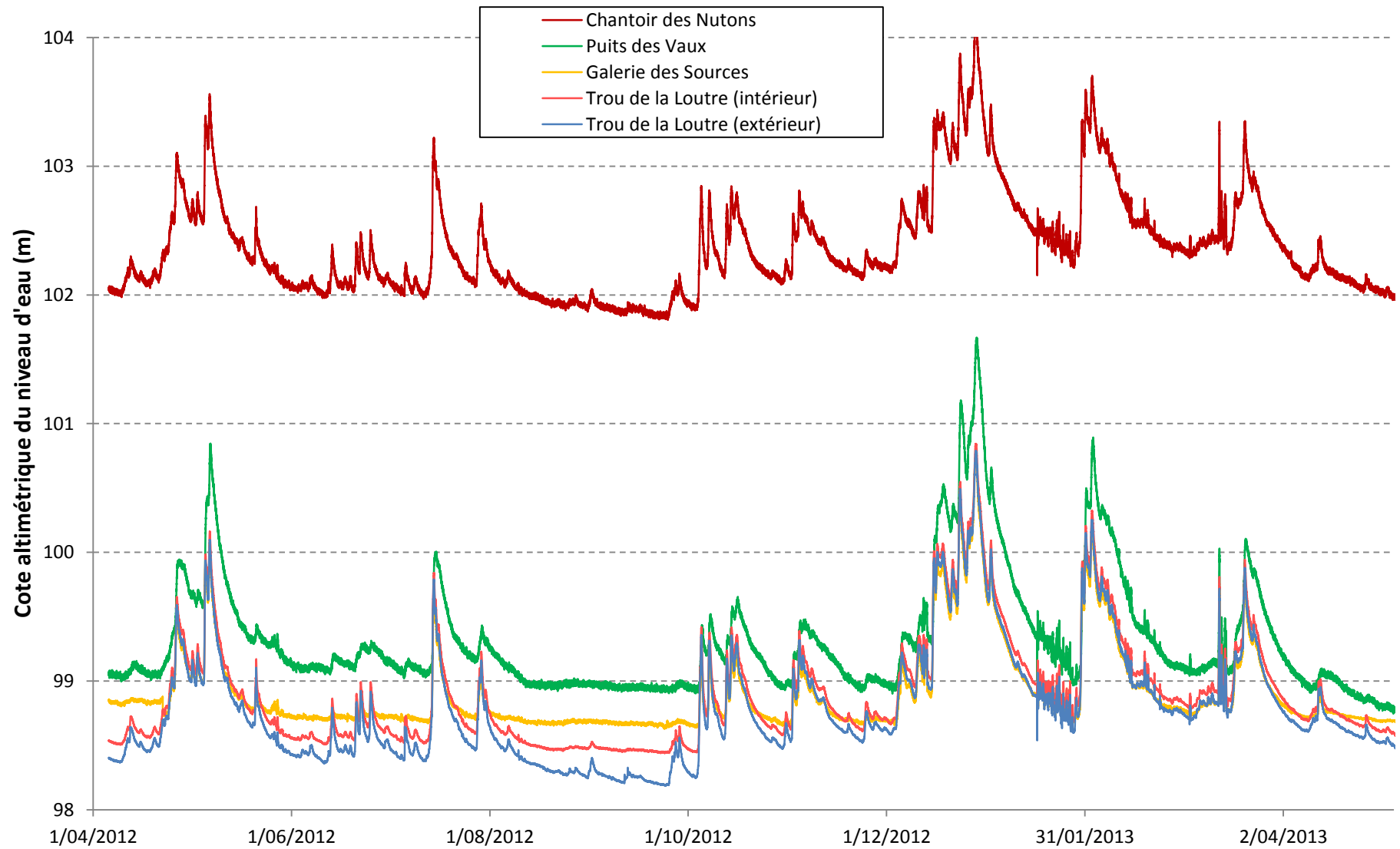


Figure II-3 : Chroniques limnimétriques des cinq stations du réseau de la Lesse souterraine de Furfooz d'avril 2012 à mai 2013.

II.3.2. Débits de la Lesse aérienne et souterraine

Le débit de la Lesse aérienne est mesuré automatiquement à la station de Gendron, située 700 mètres en amont du Chantoir des Nutons. Les données, provenant du Service Public de Wallonie, offrent une archive des débits en ce point depuis plus de 40 ans. La **Figure II-5** présente la chronique de débit à la station de Gendron pour la période avril 2012 – mai 2013.

En ce qui concerne le débit de la Lesse souterraine, il a été évalué à la station de la Galerie des Sources. La configuration des lieux a permis la réalisation de mesures de jaugeage manuelles par la méthode d'investigation des champs de vitesse. Cette méthode repose sur la mesure de la vitesse du courant sur 11 verticales équidistantes le long d'un profil transversal à la rivière. Pour chaque verticale, 5 mesures sont réalisées à différentes profondeurs afin d'obtenir un profil complet de vitesse pour la section considérée. L'intégration de l'ensemble des vitesses sur la section considérée permet d'obtenir un débit en m³/seconde. Pour chaque mesure ponctuelle de jaugeage, la distance verticale séparant le niveau d'eau du repère fixe de la station est mesurée, et ce afin de permettre d'établir une relation entre le niveau d'eau et le débit.

Cette relation entre le niveau d'eau et le débit est exprimée par la courbe de tarage (**Figure II-4**). En appliquant l'équation de la courbe de tarage sur les données de cotes altimétriques du niveau d'eau, un hydrogramme représentant les débits en fonction du temps est dressé (**Figure II-5**). Comme cité précédemment, l'hydrogramme de la Galerie des Sources était le seul potentiellement réalisable sur le cours de la Lesse souterraine. Un débit identique pour tout le tracé souterrain a donc été considéré.

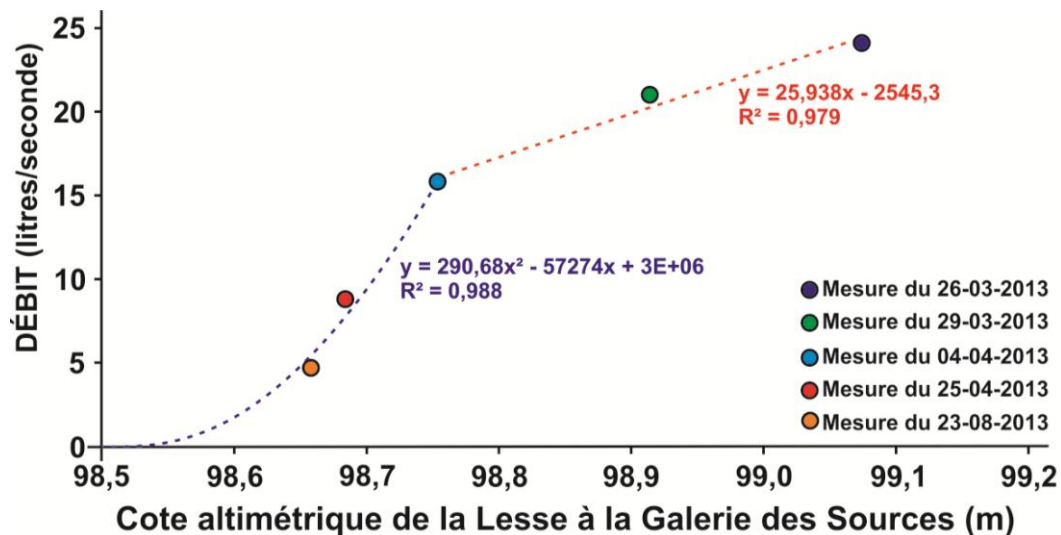


Figure II-4 : Courbe de tarage à la station de la Galerie des Sources.

Les débits enregistrés à la station de Gendron varient entre 1,9 m³/sec à l'étiage (septembre 2012) et 108,4 m³/sec en période de crue (fin décembre 2012 – début janvier 2013). Les débits de la Lesse souterraine à la Galerie des Sources suivent de façon exacte l'allure des fluctuations de la Lesse aérienne.

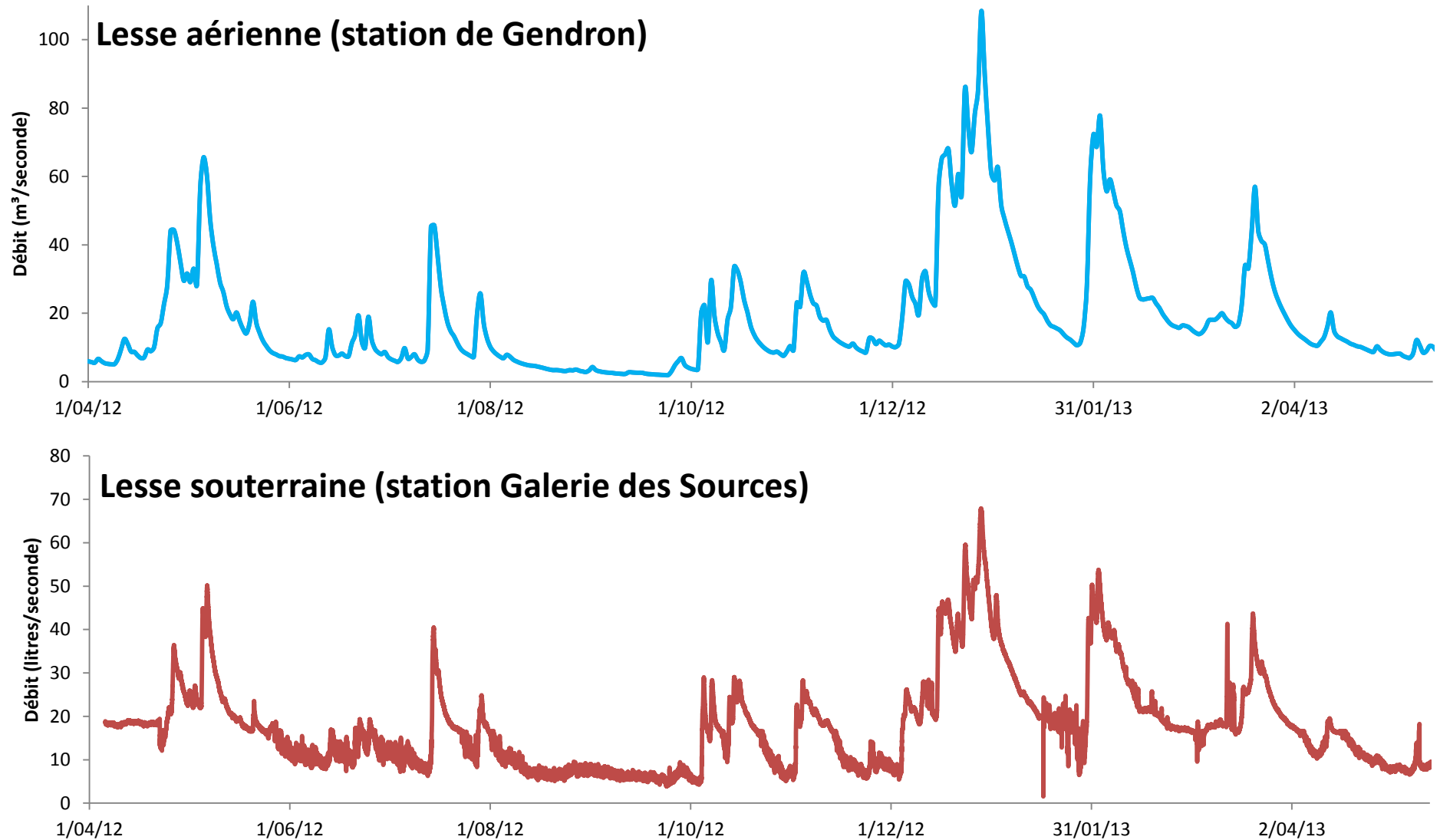


Figure II-5 : Chroniques de débits pour la Lesse aérienne (Gendron) et la Lesse souterraine (Galerie des Sources) – Noter la différence d'unité des axes verticaux.

Ceci montre l'influence directe du débit de la Lesse aérienne sur le fonctionnement du réseau souterrain. Le débit mesuré à la Galerie des Sources varie de 5 à 6 litres/sec en période d'étiage (septembre 2012) à 65 litres/sec en période de crue (début janvier 2013). Les débits au-delà de 25 litres/seconde restent cependant peu fiables vu le manque de données de jaugeages lors des périodes de hautes eaux.

Les deux hydrogrammes couvrent une année complète, ce qui permet d'identifier les périodes de basses et de hautes eaux. La première s'étale de juin 2012 à octobre-novembre 2012. Celle-ci montre une période d'étiage couvrant les mois d'août et septembre 2012. La période de hautes eaux débute durant l'automne 2012 avec les premiers pics de crues en octobre. Celle-ci est caractérisée par trois périodes de crues intenses suivies chacune d'une période de tarissement. Les légères différences observées dans l'hydrogramme de la Lesse souterraine sont imputables à divers phénomènes :

- une plus grande fréquence d'enregistrement à la station souterraine (5 minutes pour la Lesse souterraine, contre une moyenne quotidienne pour la Lesse aérienne) ;
- des effets d'obstruction (végétation, sédiments...) à différents niveaux (Chantoir des Nutons, siphons...) entraînant des variations de régime dans la Lesse souterraine ;
- l'effet d'une période de gel (seconde moitié de janvier 2013) qui semble avoir perturbé de manière ponctuelle le fonctionnement du cours souterrain. Cette anomalie est observée à toutes les stations de mesures (**Figure II-3** et **Figure II-5**).

II.4. Conditions physico-chimiques

II.4.1. Températures

La température de l'eau a été mesurée aux cinq stations durant une année complète, ce qui permet de mettre en évidence différents types de comportements selon la position dans le réseau. La **Figure II-6** présente la chronique de débit d'avril 2012 à mai 2013, en regard de la courbe de débit de la Lesse souterraine mesurée à la Galerie des Sources.

Le premier type de comportement est celui de la Lesse aérienne, mesuré au Chantoir des Nutons. On y observe une fluctuation saisonnière entre 0 et 20°C à laquelle se surimpose une fluctuation à plus haute fréquence influencée par les variations jour/nuit. Il s'agit de la signature classique d'une eau superficielle.

Le second comportement est celui de la Lesse souterraine, mesuré au Puits des Vaux, à la Galerie des Sources et à l'intérieur du Trou de la Loutre. On y voit un cycle saisonnier oscillant entre environ 11 °C en été et 9 °C en hiver. Ce comportement est celui d'une eau souterraine qui se met progressivement en équilibre avec son milieu. Les grottes sont connues pour avoir des températures très stables, reflétant la température moyenne annuelle externe. Cet équilibre progressif est bien visible de par le fait que les stations situées plus en aval dans le système présentent les températures les plus stables. Ainsi, la température au Puits des Vaux est légèrement plus variable que celle de la Galerie des Sources, elle-même plus variable que celle du Trou de la Loutre.

Le troisième comportement est un type mixte entre les températures de la Lesse aérienne et souterraine. Les stations du Trou de la Loutre présentent, par moment, un tel comportement et il est facilement démontrable que c'est la hauteur d'eau (donc le débit) de la Lesse aérienne qui joue un rôle prédominant à ce niveau.

En effet, une rapide analyse montre que les températures des deux stations du Trou de la Loutre sont sensiblement identiques, sauf pour certaines périodes particulières où des augmentations/diminutions brusques de la température sont observées. En juxtaposant la chronique de température des sondes du Trou de la Loutre et de la Lesse aérienne (Chantoir des Nutons), il est aisé de comprendre que ces variations sont dues à un apport d'eau du cours aérien. Les crues de la Lesse aérienne viennent influencer positivement la température de l'eau du Trou de la Loutre en été, et négativement en hiver. La **Figure II-7** illustre ce principe pour la période hivernale de hautes eaux, d'octobre 2012 à avril 2013. Durant cette période, chaque augmentation de débit de la Lesse aérienne est accompagnée d'une baisse brusque de la température à la station externe du Trou de la Loutre. En ce qui concerne la station interne, seules les crues les plus rapides (le 13/12/12 et le 27/01/13) engendrent une influence sur sa température. Les données de conductivités dressent le même constat en ce qui concerne la station interne du Trou de la Loutre. Cette sonde interne, au Trou de la Loutre, enregistre donc un signal exclusivement souterrain, mises à part quelques périodes de crues extraordinaires. La sonde externe mesure également les paramètres physico-chimiques de l'eau souterraine, mais se trouve plus fréquemment influencée par les crues du cours aérien.

II.4.2. Conductivité électrique

Les chroniques de conductivité électrique (**Figure II-6**) montrent deux grandes tendances dans les valeurs, de la même manière que pour la température. L'eau de la Lesse aérienne, au Chantoir des Nutons, présente les caractéristiques d'une eau de surface avec une conductivité faible. La gamme varie d'une valeur quasi nulle à une valeur légèrement supérieure à 0,3 mS/cm. Les variations importantes de conductivité ne peuvent pas systématiquement être mises en corrélation avec les changements du débit de la Lesse aérienne. C'est donc probablement d'autres effets, plus en amont, qui influencent la conductivité électrique de l'eau de la rivière. À ce titre, le comportement drainant de la Lesse par endroit peut contribuer à l'apport d'eau souterraine de forte conductivité.

La seconde tendance est celle des eaux souterraines, mesurées au Puits des Vaux, à la Galerie des Sources et à l'intérieur du Trou de la Loutre. Les valeurs sont nettement plus élevées et stables que dans le cas d'une eau de surface. Les chroniques montrent des valeurs moyennes d'environ 0,4 mS/cm, variant rarement au-delà de $\pm 0,05$ mS/cm. Ces valeurs plus élevées sont le signe d'une eau ayant séjourné plus longtemps dans le système karstique et qui s'est chargée en éléments dissous (principalement Ca^{2+} et Mg^{2+} dans ce cas). Les trois courbes montrent une tendance très stable en période de basses eaux (juin à octobre 2012) et une augmentation en période de hautes eaux (novembre 2012 à mai 2013). Ceci est à

mettre en relation avec la remontée du niveau piézométrique régional durant les hautes eaux, qui vient probablement augmenter le signal de conductivité par un apport plus important d'eau souterraine, dû à un certain drainage de la nappe par la Lesse souterraine.

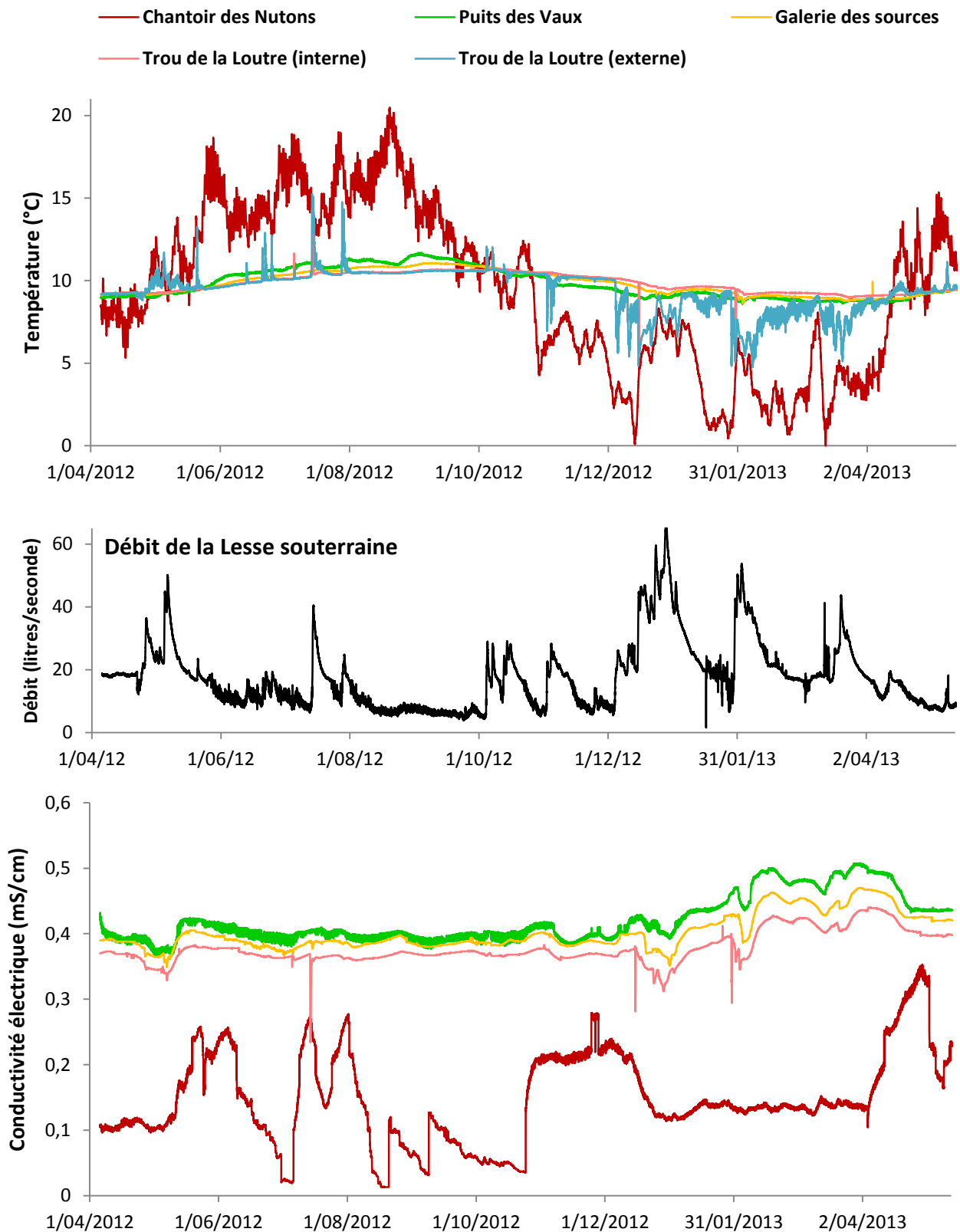


Figure II-6 : Chroniques de température et de conductivité électrique pour les différentes stations du réseau en regard du débit de la Lesse souterraine mesuré à la Galerie des Sources.

Entre les trois stations, le Puits des Vaux montre les valeurs les plus élevées. Ceci est à nouveau le signe que l'eau du Puits des Vaux ne représente pas l'eau du drain principal de la Lesse souterraine, mais bien celle d'un système annexe. Ce grand volume d'eau, quasi immobile, semble avoir un temps de séjour prolongé dans le réseau, ce qui contribue à augmenter sa conductivité. L'eau de la Galerie des Sources et du Trou de la Loutre est plus représentative des conditions du drain principal de la Lesse souterraine. C'est pour cette raison que leurs chroniques montrent des conductivités témoignant d'un mélange entre l'eau de surface (Chantoir des Nutons) et l'eau souterraine (Puits des Vaux).

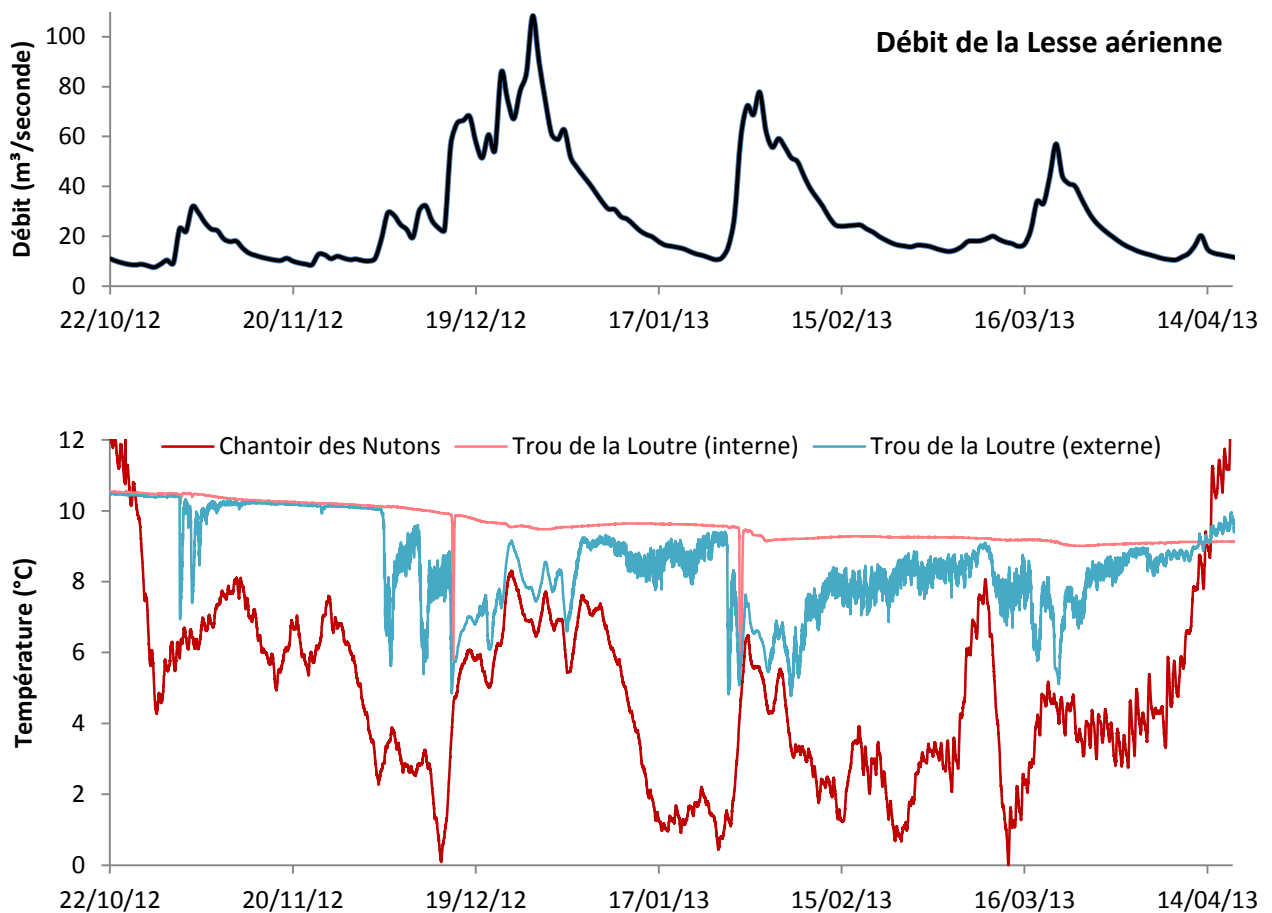


Figure II-7 : Illustration de l'influence des crues de la Lesse aérienne sur la température mesurée aux sondes internes et externes du Trou de la Loutre durant la période hivernale de hautes eaux de 2012-2013.

II.5. Historique des essais de traçage qualitatifs

De nombreux essais de traçages ont été menés depuis plus d'un siècle sur le site de Furfooz. Dans un premier temps, ces « colorations » avaient simplement pour but de déterminer l'existence d'éventuelles connexions hydrologiques entre les différents points d'observations de la Lesse souterraine. Un bref descriptif de l'ensemble de ces traçages qualitatifs est proposé dans ce chapitre. Pour chacune des expériences, une figure reprend les trajets ainsi que les temps et vitesses caractéristiques.

II.5.1. Traçages de 1902 (Vandenbroeck et al., 1910)

En 1902, E. Vandenbroeck, E.A. Martel et E. Rahir réalisèrent des tests de colorimétrie dans le but de confirmer leurs théories sur l'existence d'un recouplement souterrain de méandre de la Lesse. Ces tests étaient uniquement qualitatifs et visuels, basés sur l'intensité de la coloration de l'eau. Leur premier test fut une injection d'uranine à la Galerie des Sources. Le trajet fut rapide et l'arrivée première se fit après 7 h au Trou de la Loutre (**Figure II-8**).

Leur second test consista en une injection d'uranine au Chantoir des Nutons. Leurs résultats, présentés à la **Figure II-8**, sont venus confirmer l'existence d'un double recouplement de méandre avec un temps de transit d'un peu plus de 70 heures au total.

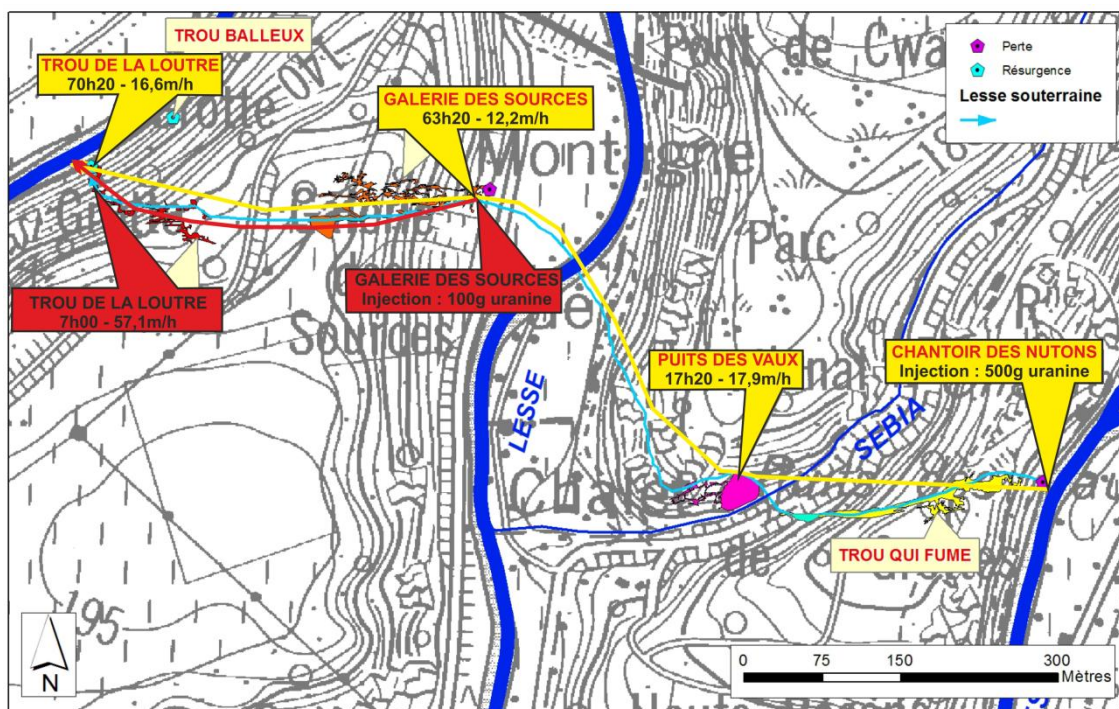


Figure II-8: Traçage de décembre 1902 (Vandenbroeck et al. 1910).

II.5.2. Traçages par le Werkgroep Fysische Speleologie (1987 – 1988 ; Van Es et al., 1992)

En septembre 1987 et juillet 1988, le Werkgroep Fysische Speleologie a réalisé deux traçages au départ du réseau de la Galerie des Sources. Le premier concernait le trajet Galerie des Sources (amont siphon 1) – Salle Kasper et résurgence au pied du Trou Balleux. Le second fut réalisé entre la Salle Kasper et les deux résurgences (**Figure II-9**).

Les résultats présentés à la **Figure II-9** montrent qu'une connexion existe entre la Salle Kasper et le Trou de la Loutre, mais pas entre cette salle et la résurgence au pied du Trou Balleux. Cependant, une liaison entre la Galerie des Sources et le Trou Balleux a également été prouvée. Ceci démontre qu'il existe une diffuence dans ce réseau quelque part entre la Galerie des Sources et la Salle Kasper. L'exsurgence au pied du Trou Balleux semble être une résurgence supplémentaire du système.

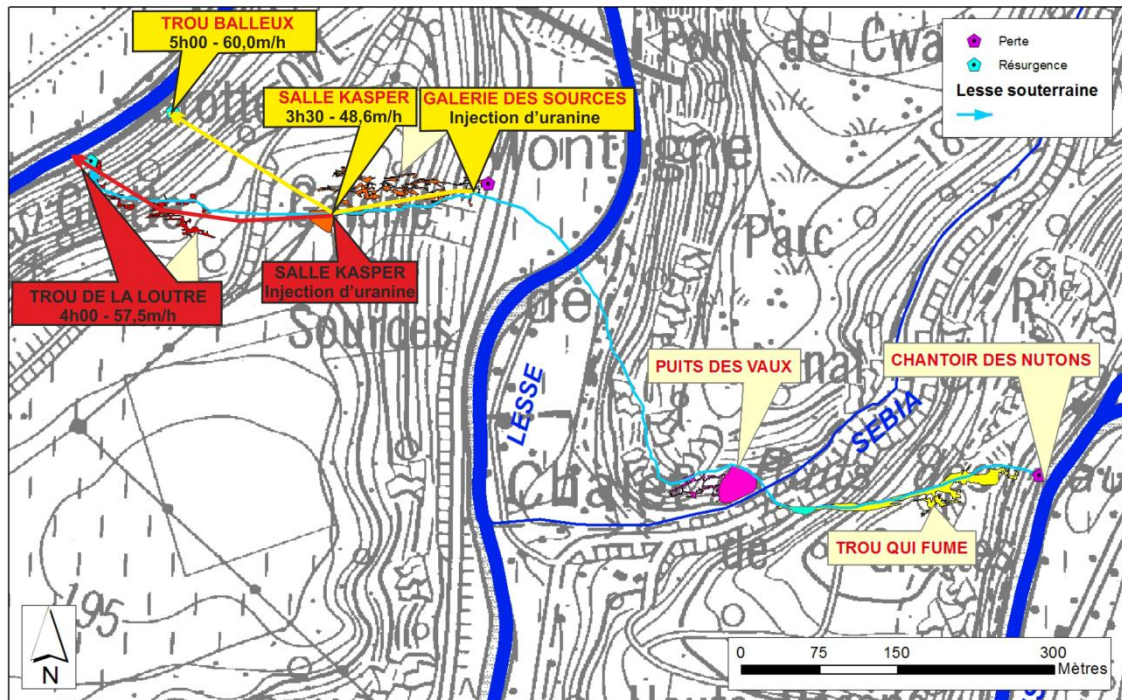


Figure II-9 : Traçage de 1987 - 1988 par le WFS (Van Es et al., 1992).

II.5.3. Traçages par le Spéléoklub Hadès (1998)

En novembre 1998, le Spéléoklub Hadès a également mené deux traçages dans le système de la Lesse souterraine (**Figure II-10**). Un premier traçage a été réalisé entre la Galerie des Sources et le Trou de la Loutre. Des fluo-capteurs furent placés à l'amont du Trou de la Loutre et l'un d'eux correspondait à la résurgence au pied du Trou Balleux. Ce traçage a confirmé un trajet de 7 h 30 pour le tracé Galerie des Sources - Trou de la Loutre. Il a également confirmé la présence de tributaires au cours principal, qui atteignent certaines résurgences à l'amont de Trou de la Loutre.

Le second traçage a été réalisé entre le Puits des Vaux et la Galerie des Sources. Des charbons actifs ont également été placés à deux points de la rive de la Lesse aérienne. Le but était de détecter une éventuelle résurgence partielle de la Lesse Souterraine dans la Lesse aérienne, après le premier recoupement de méandre. Des charbons actifs ont donc été placés quelques dizaines de mètres en amont et en aval du point de cette résurgence supposée. D'autres charbons actifs ont été placés dans la Galerie des Sources afin de détecter l'arrivée de l'uranine. Les charbons actifs, placés à l'aval de la résurgence supposée dans la Lesse, se sont montrés positifs 45 h après l'injection au Puits des Vaux tandis que ceux placés en amont de ce point sont restés négatifs. Une résurgence partielle dans la Lesse

aérienne semble donc exister. Les charbons placés dans la Galerie des Sources se sont avérés positifs après 62 h.

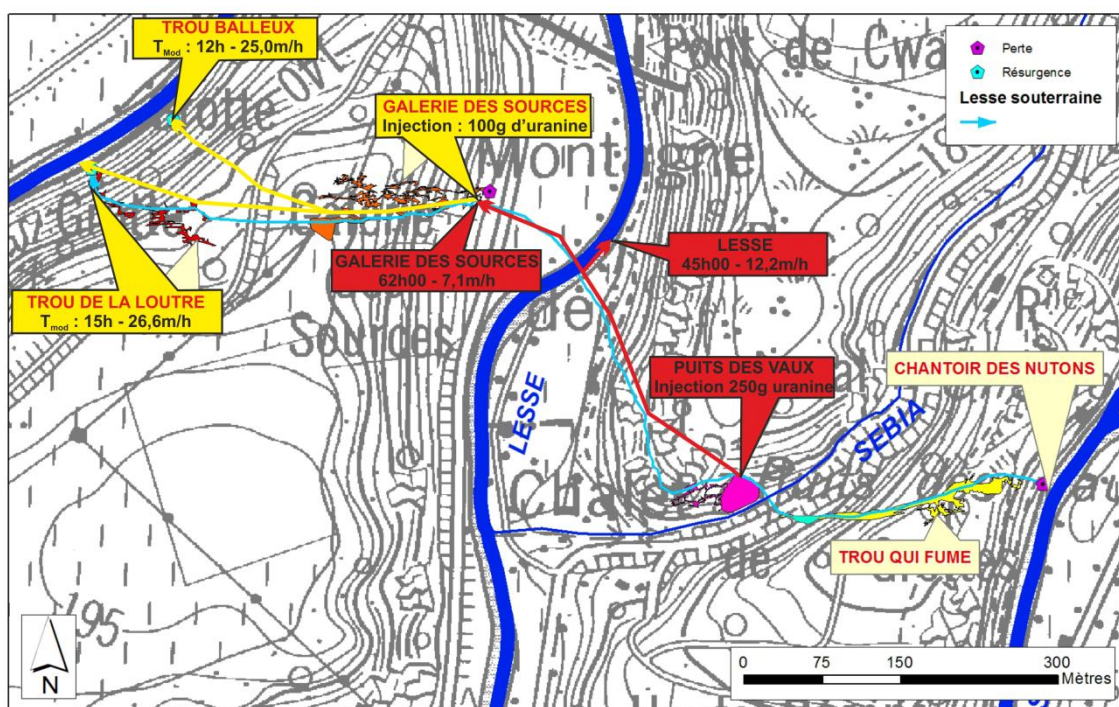


Figure II-10 : Traçage en 1998 par le Spéléoklub Hadès.

II.5.4. Synthèse des traçages qualitatifs historiques

Les temps de transit caractéristiques mis en évidence par les traçages historiques sont repris dans le **Tableau II-2**, ci-dessous. Ce tableau dresse un premier aperçu du fonctionnement du réseau souterrain de la Lesse de Furfooz.

Date	Auteur	Injection	Site	Nutons	Puits des Vaux	Lesse	Galerie des Sources	Salle Kasper	Trou Balleux	Trou de la Loutre	Débit Lesse (m³/sec)
Déc. 1902	VdB et al.	500g uranine	Nutons	17h20 – 23h – 312h							Lesse en crue
				71h (63h20) – 94h							
				72h (70h20 ?)							
Nov. 1998	Hadès	250g uranine	PDV		45h						22,37
					62h						
Sept. 1987	WFS	uranine	GDS				3h30				13,194
							5h				
Nov. 1998	Hadès	100g uranine	GDS				12h				22,37
							7h30 – 15h – 24h45				
Déc. 1902	VdB et al.	100g uranine	GDS				7h – 10-24h – 34h				
Juillet 1988	WFS	uranine	Salle Kasper					Négatif			11,756
								4h			

Tableau II-2 : Synthèse des traçages historiques dans la Lesse souterraine de Furfooz – Temps d'arrivée première, temps modal, temps total de restitution (estimations).

Partie 3 : Modélisation et dimensionnement du système karstique de la Lesse souterraine

I. Introduction et objectifs

En plus de permettre la détermination de connexions hydrologiques au sein de réseaux karstiques, les techniques de traçage modernes permettent d'apporter de nombreuses informations quantitatives à propos du système étudié. C'est le cas notamment des paramètres d'écoulement et de transport hydraulique. L'objectif de cette partie de l'étude est d'utiliser les données d'une série de nouveaux traçages quantitatifs afin de tenter de modéliser et de dimensionner le réseau d'écoulement de la Lesse souterraine de Furfooz. Cette modélisation comprend deux étapes :

- le calcul des résultats des nouveaux traçages à l'aide du logiciel Qtracer2, afin de quantifier les paramètres d'écoulements et de transport pour l'ensemble du réseau de la Lesse souterraine ;
- le dimensionnement du réseau karstique actif (rivière souterraine et zones noyées) grâce à la modélisation des résultats d'essais de traçage par le logiciel Otis.

II. Nouveaux essais de traçage et quantification des paramètres d'écoulement avec le logiciel Qtracer2

II.1. Généralités

Dans le cadre de ce mémoire, cinq essais de traçage ont été réalisés sur le site de Furfooz, en plus de ceux déjà réalisés par l'Université de Namur en 2008. Ce chapitre reprend la théorie relative aux essais de traçage ainsi que les résultats de l'ensemble de ces expériences.

II.1.1. Principe des essais de traçage

Un essai de traçage en milieu karstique consiste en l'injection d'une substance traçante à un point du système (dans ce cas, une perte ou un point d'observation de la Lesse souterraine) et à mesurer sa restitution à un point à l'aval de la zone d'injection (dans ce cas, une résurgence ou un point d'observation de la Lesse souterraine). La concentration de traceur restituée est mesurée à l'aide de fluorimètres automatiques (**Annexe 1**) et présentée sous forme d'une courbe de restitution (**Figure II-1**). L'utilisation des fluorimètres possède de nombreux avantages tels que la résolution temporelle des mesures, l'automatisation et l'acquisition rapide des données.

Dans le cadre d'un essai de traçage, le choix de la substance traçante est capital : « *En hydrogéologie, le traceur idéal doit être représentatif du mouvement de l'eau, c'est-à-dire que son comportement à l'écoulement doit s'approcher de celui de l'eau elle-même* » (Schudel et al., 2002).

Un bon traceur doit donc être :

- stable chimiquement ;
- faiblement adsorbable ;
- facilement soluble dans l'eau.

Il doit également remplir quelques conditions pratiques importantes, telles que la non-toxicité, une utilisation facile, un faible coût et une limite de détection basse. Pour ces raisons, le traceur idéal n'existe pas et le choix s'opère en fonction de la situation hydrogéologique. Dans le cadre des diverses campagnes de traçages, c'est l'uranine et la suflorhodamine B qui ont été utilisées (voir en **Annexe 2** pour une description complète de ces substances).

II.1.2. Informations apportées par les essais de traçage

Le résultat d'un essai de traçage est représenté sous forme d'une courbe de restitution sur laquelle est exprimée la concentration du traceur en fonction du temps (généralement en ppb, soit des $\mu\text{g/litre}$ d'eau ; Schudel et al., 2002). Cette courbe permet la visualisation des différents temps de transit caractéristiques : temps de première arrivée, temps modal, temps moyen et temps total de restitution (**Figure II-1**).

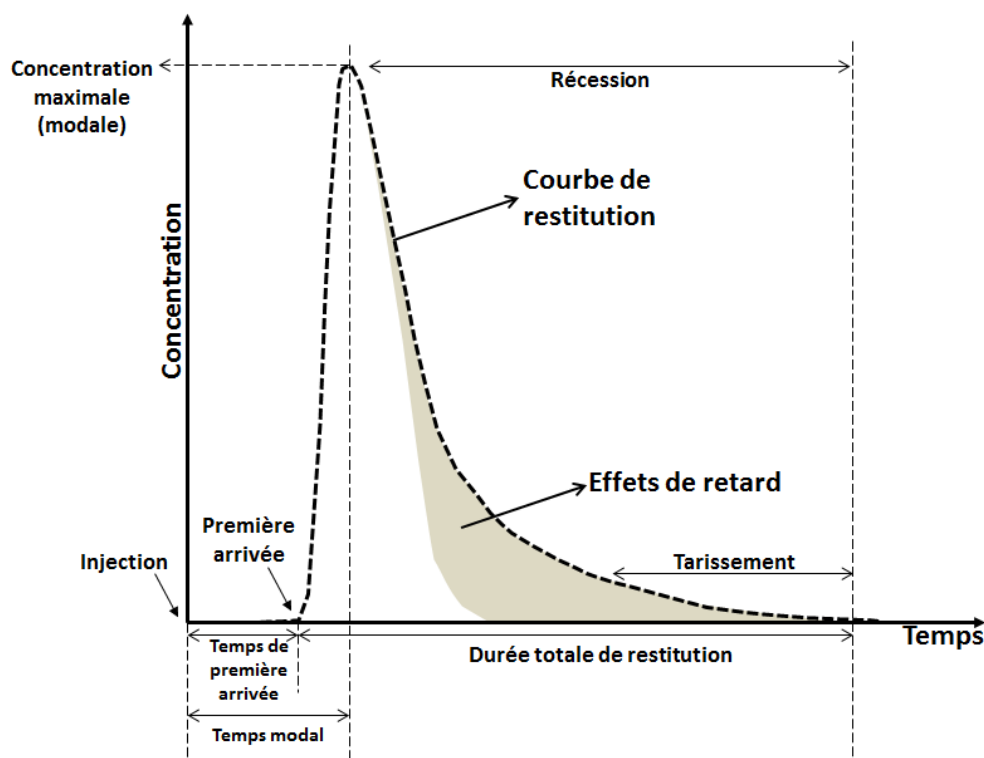


Figure II-1 : Exemple de courbe de restitution et des informations qui y figurent (Bonniver, 2011 – modifié).

Le temps de première arrivée (T_{AP}) correspond à la première détection du traceur au point d'échantillonnage. Le temps modal (T_{Mod}) correspond au temps lorsque la concentration du traceur est maximale (pic de concentration). Le temps moyen de transit (T_{Moy} ou \bar{t}) correspond au moment du passage du centre de gravité du nuage de traceur et est exprimé selon (Bonniver, 2011) :

$$\bar{t} = \int_0^{+\infty} t h(t) dt$$

Où : $h(t) = \varphi(t)/M_r$

Avec : $\varphi(t) = \text{flux} = Q(t)C(t)$ et $M_r = \text{Masse restituée}$

La connaissance, en plus ou moins bonne approximation dans le cas d'un système karstique, des distances de transit (x), permet de calculer des vitesses de transit :

- vitesse maximale de transit : $V_{max} = x/T_{AP}$;
- vitesse modale : $V_{mod} = x/T_{Mod}$
- vitesse moyenne : $V_{moy} = x/T_{Moy}$

D'autres informations peuvent également être apportées par la courbe de restitution :

- le taux de restitution (TR) en % (pour autant qu'une mesure de débit soit mesurable au point d'échantillonnage, ce qui n'est pas toujours le cas) ;
- la concentration maximale atteinte (C_{max}) ;
- la durée totale de restitution (T_r).

Schudel et al. (2002) indiquent qu'un traceur dissous dans l'eau souterraine peut être soumis aux processus suivants :

- transport convectif provoqué par l'écoulement de l'eau souterraine ;
- dispersion hydrodynamique, c'est-à-dire l'étalement du nuage de traceur principalement en raison de la dispersion cinématique ;
- éventuellement des processus d'échange par diffusion entre eau mobile et eau immobile dans les milieux à double porosité (milieux fissuré et karstique, zone non saturée) ;
- éventuellement adsorption et désorption sur des éléments de tissus granulaires ;
- éventuellement dégradation du traceur par des processus microbiologiques ou chimiques.

Une courbe de restitution va refléter l'effet de ces différents processus. C'est pourquoi, elle permet également d'obtenir des informations sur les paramètres hydrodispersifs du milieu traversé. Outre les paramètres standards (temps, vitesses, concentrations), les courbes de restitutions seront également analysées dans le but de caractériser au maximum l'environnement d'écoulement. Pour ce faire, l'utilisation de logiciels d'analyse de courbes de restitution, tel que Qtracer2, a été nécessaire.

II.2. Calibration des paramètres des courbes de restitution avec le logiciel Qtracer2 (Field, 2002)

Les résultats des essais de traçage réalisés ont été analysés à l'aide du logiciel Qtracer2 (Field, 2002). Ce logiciel permet la quantification des paramètres des courbes de restitution (timing, vitesses, taux de restitution). Des paramètres propres aux caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement sont également estimés (dimension de la zone d'écoulement, dispersivité...).

II.2.1. Description de Qtracer2 (Field, 2002)

Le logiciel Qtracer2 a été conçu par la **NCEA** (National Center for Environmental Assessment), pour permettre l'interprétation facile et rapide des résultats des essais de traçage. Qtracer est utilisable dans différents contextes hydrologiques parmi lesquels les

rivières, les aquifères ou les conduits karstiques noyés. La condition principale d'application est l'utilisation d'un traceur conservatif (Bonniver, 2011).

Dans un milieu de type conduit karstique, le logiciel repose sur un modèle basé sur l'équation générale de convection-dispersion qui décrit le transport d'un traceur le long d'un conduit (Field, 2002) :

$$R_f \frac{\partial C}{\partial t} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v_L \frac{\partial C}{\partial x} - \mu C \quad (1)$$

Où :

C	- concentration du traceur ;	v_L	- vitesse effective ;
t	- temps ;	μ	- coefficient de dégradation ;
x	- distance ;	R_f	- coefficient de retardement ;
D_L	- coefficient de dispersion longitudinale.		

Partant du principe que la longueur du conduit est largement supérieure à ses autres dimensions, le coefficient de dispersion et la vitesse effective sont limités à leur composante longitudinale (Bonniver, 2011).

Pratiquement, il suffit d'insérer dans le logiciel les données relatives au traçage (données d'injection, distance, débit...) ainsi que les données de restitution. Qtracer2 calcule ensuite les différents paramètres d'écoulement et de transport propres au milieu tracé. Bonniver (2011) schématise le fonctionnement de Qtracer2 de la manière suivante (**Figure II-2**) :

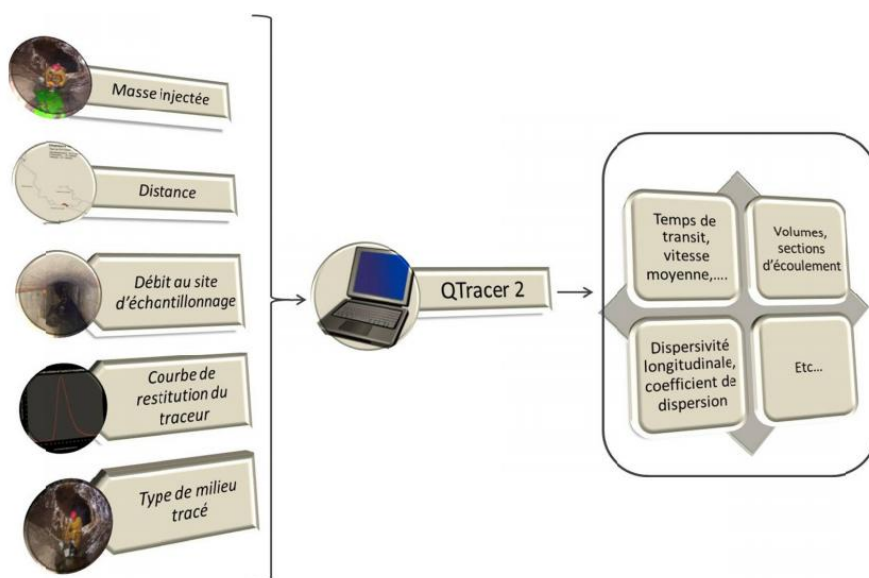


Figure II-2 : Schématisation du fonctionnement type "boîte noire" du logiciel Qtracer2 (Bonniver, 2011).

II.2.2. Quantification des paramètres (Field, 2002)

Les paramètres hydrauliques des conduits karstiques sont estimés par la méthode des moments. Cette méthode consiste à évaluer la surface sous la courbe de restitution (Field, 2002). Le moment zéro est utilisé pour estimer le taux de restitution du traceur. Le premier moment est utilisé pour estimer le temps de résidence moyen et la vitesse moyenne de

l'écoulement et le second moment est utilisé pour estimer la dispersion longitudinale. Le chapitre ci-dessous explicite les principaux paramètres calculés par Qtracer2 qui seront utilisés dans cette étude. Les variables utilisées dans les équations de ce chapitre sont reprises dans le **Tableau II-1**, ci-dessous.

Variable		Unité
A	Section d'écoulement	L ²
A _i	Accuracy index	adimensionnel
a _L	Dispersivité longitudinale	L
C	Concentration en traceur	ML ⁻³
D _C	Diamètre du conduit karstique	L
D _L	Coefficient de dispersion longitudinale	L ² T ⁻¹
M ₀	Masse de traceur restituée en un site d'échantillonnage	M
M _{inj}	Masse de traceur injectée	M
M _T	Masse totale de traceur restituée	M
ν	Viscosité dynamique de l'eau	ML ⁻¹ T ⁻¹
RN	Nombre de Reynolds	adimensionnel
PN	Nombre de Peclet	adimensionnel
Q	Débit	L ³ T ⁻¹
ρ	Densité du milieu	ML ⁻³
t	Temps d'échantillonnage	T
\bar{t}	Temps moyen de séjour	T
t ₂	Temps d'une injection instantanée de traceur	T
TR	Taux de restitution	%
\bar{v}	Vitesse moyenne d'écoulement	LT ⁻¹
V	Volume d'écoulement	L ³
x	Distance entre les sites d'injection et d'échantillonnage	L
σ _t	Déviation standard pour le temps de résidence moyen	T

Tableau II-1 : Variables et unités - L : unité de longueur, M : unité de masse, T : unité de temps.

II.2.2.1. Masse de traceur restituée et taux de restitution

L'estimation de la restitution du traceur à une station d'échantillonnage est donnée par l'équation **(2)** (Gaspar, 1987b in Field, 2002).

$$M_0 = \int_0^\infty C(t) Q(t) dt \quad (2)$$

Dans le cas de figure présent, la quantité de traceur restituée à n'importe quel site d'échantillonnage représente la quantité totale de traceur restituée. On a donc, pour tout site échantillonné :

$$M_0 = M_T \quad (3)$$

Le taux de restitution est simplement le rapport entre la quantité de traceur restituée et la quantité injectée.

$$TR (\%) = \frac{M_T}{M_{inj}} \times 100 \quad (4)$$

On peut exprimer la qualité d'un traçage via un indice de précision basé sur la masse restituée (Sukhodolov et al. 1997). Cet « accuracy index » est donné par l'équation **(5)**.

$$A_I = \frac{M_{inj} - M_T}{M_{inj}} \quad (5)$$

Un $A_I = 0$ indique un traçage parfait où toute la masse de traceur a été restituée. Si $A_I > 0$, la quantité de traceur injectée est supérieure à la quantité restituée. Si $A_I < 0$, la quantité de traceur injectée est inférieure à la quantité restituée.

Un haut taux de restitution est important lors d'une expérience de traçage. Cela indique que toutes les sections d'écoulement ont été correctement échantillonnées. Dans le cas contraire, il est possible qu'une partie de l'écoulement souterrain ait été manquée. Il est cependant nécessaire d'adapter l'interprétation pour chaque cas de figure. Ainsi, dans le cas présent, vu la configuration du système (vastes volumes souterrains aux temps de séjours prolongés), un taux de restitution faible n'indique pas nécessairement un manquement au niveau de l'échantillonnage.

II.2.2.2. Temps moyen de séjour et vitesse moyenne

Le temps moyen de séjour du traceur est le temps nécessaire pour que le centre de gravité du nuage de traceur traverse la totalité du réseau. Cette durée représente le temps de renouvellement du système souterrain, elle est estimée par l'équation **(6)** (Gaspar, 1987a in Field, 2002)

$$\bar{t} = \frac{\int_0^\infty t C(t) Q(t) dt}{\int_0^\infty C(t) Q(t) dt} \quad (6)$$

La vitesse moyenne est égale à la vitesse de déplacement du centre de gravité du nuage de traceur. Elle est donnée, pour une injection ponctuelle, par l'équation **(7)** (Gaspar, 1987b in Field, 2002)

$$\bar{v} = \frac{\int_0^{\infty x} \bar{t} C(t) Q(t) dt}{\int_0^\infty C(t) Q(t) dt} \quad (7)$$

Dans la plupart des cas, la longueur du système (x) est mesurée en ligne droite et ne tient pas compte de la sinuosité du conduit karstique. On y ajoute généralement un facteur de correction. Cependant, dans le cas présent, les distances ont été mesurées en tenant compte de la sinuosité du cours d'eau souterrain, le facteur de sinuosité n'est donc pas utilisé.

II.2.2.3. Dispersion longitudinale et dispersivité longitudinale

Le coefficient de dispersion longitudinale est une mesure du taux auquel une masse de traceur se disperse le long de son parcours (Mull et al., 1988 in Bonniver, 2011). La dispersion longitudinale et latérale d'une masse de traceur injectée ponctuellement dans un conduit karstique se comportera généralement comme indiqué dans la **Figure II-3**. Dans cette figure, le comportement du traceur est montré en fonction de la distance, le long de lignes de courant imaginaires.

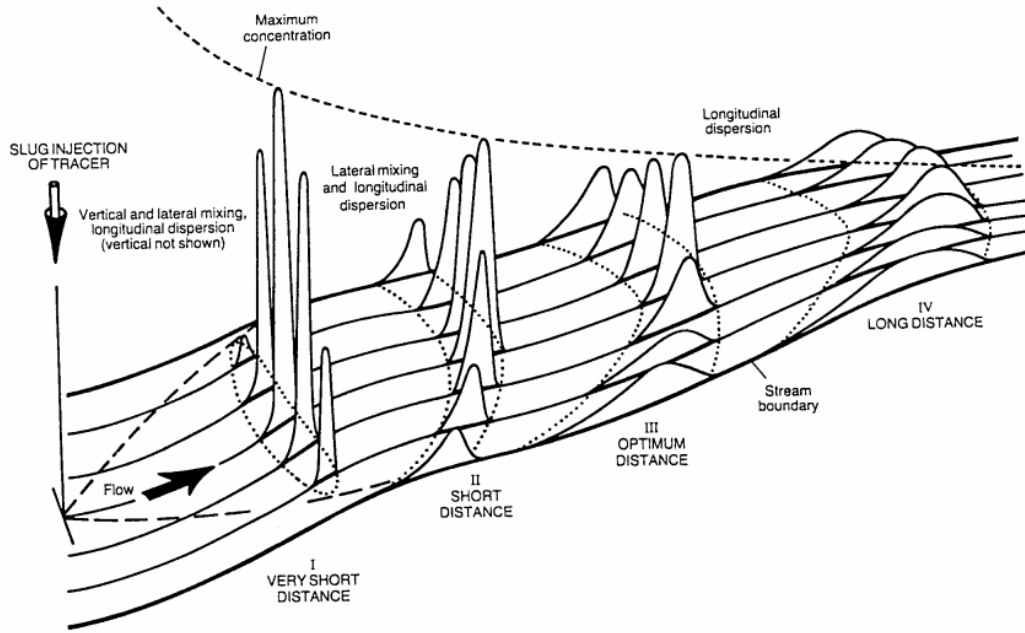


Figure II-3 : Mélange latéral et dispersion longitudinale - Distribution des concentrations en traceur en fonction de la distance parcourue pour une injection de traceur ponctuelle (Kilpatrick & Wilson, 1989).

Kilpatrick et Wilson (1989) indiquent qu'un traceur soluble non réactif injecté dans le courant d'une rivière se comporte de la même manière que les particules d'eau. La dispersion et le mélange du traceur dans le flux se font dans les trois dimensions. Le mélange vertical s'effectue normalement avant le mélange latéral. La dispersion longitudinale n'a pas de limite et s'étend indéfiniment, il s'agit de la composante de dispersion la plus intéressante à étudier dans le cas de conduits karstiques (Kilpatrick & Wilson, 1989).

La dispersion longitudinale est communément estimée en utilisant le second moment (Maloszewski & Zuber, 1992). L'équation (8) exprime la dispersion dans le cas d'une injection instantanée (Wolff et al., 1979).

$$D_L = \left(\sigma_t^2 - \frac{t_2}{12} \right) \frac{v^3}{2x} \quad (8)$$

Cette équation part du principe que la loi de Fick est toujours valable et qu'il n'y a aucun comportement anormal à l'écoulement. En réalité, les zones d'eau immobiles sont communes, ce qui cause de longues queues aux courbes de restitution, indiquant des effets de retard. Dans ce cas, la loi de Fick n'est plus d'application.

Chatwin (1971) a développé une méthode de détermination de la dispersion longitudinale qui tient compte de ces comportements anormaux. L'équation (9) exprime la dispersion longitudinale selon Chatwin (1971) :

$$\left[t \ln \left(\frac{A_p}{C\sqrt{t}} \right) \right]^{1/2} = \left[\frac{x}{2D_L^{1/2}} - \frac{\bar{v}t}{2D_L^{1/2}} \right] \quad (9)$$

La constante de proportionnalité, A_p , représente (Davis et al., 2000) :

$$A_p = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_L}} \quad (10)$$

L'équation (8), de Wolff et al. (1979), tend à surestimer D_L , suggérant une courbe de restitution davantage étendue que dans la réalité. À l'inverse, l'équation de Chatwin sous-estime D_L pour les systèmes présentant un comportement fickien. Dans Qtracer2, l'équation de Chatwin est toujours utilisée, excepté lorsque la méthode semble échouer ou lorsque la mémoire de l'ordinateur est dépassée. Dans ce cas, l'équation classique est utilisée.

En milieu poreux, il a été observé que la dispersion longitudinale est proportionnelle à la vitesse moyenne d'écoulement (Fetter, 1999) :

$$D_L = a_L \times \bar{v}$$

Le coefficient de proportionnalité, a_L , est appelé « dispersivité longitudinale » et est une propriété du milieu.

II.2.2.4. Géométrie de la zone d'écoulement

Les dimensions de la zone d'écoulement sont estimées en évaluant le débit par rapport au temps de résidence moyen du traceur. La masse de traceur restituée à une station où le débit est mesuré permet de calculer une approximation du volume maximum du système dans lequel a transité le nuage de traceur. On utilise l'équation (11) (Atkinson et al., 1973) :

$$V = \int_0^{\bar{t}} Q dt \quad (11)$$

Dans le cas présent, les valeurs de débits utilisés étaient constantes, ce qui donne :

$$V = \bar{Q} \bar{t} \quad (12)$$

La section d'écoulement peut être facilement calculée à partir du volume et de la distance totale du système :

$$A = \frac{V}{x} \quad (13)$$

Seuls ces deux dimensions seront analysées et utilisées dans la suite de ce travail. Néanmoins, l'outil Qtracer2 permet de déterminer d'autres caractéristiques géométriques de la zone d'écoulement. Pour plus d'informations, se référer à Field, (2002).

II.2.2.5. Caractéristiques hydrodynamiques

Des expériences de dynamique des fluides ont mené au développement de nombreux modèles d'écoulement pour des géométries spécifiques. Sans entrer dans la complexité de ces modèles, Qtracer permet une bonne approximation de certains paramètres hydrauliques. Une série d'approximations sont bien sûr nécessaires et la première d'entre elles est de considérer la zone d'écoulement comme un conduit cylindrique simple. Le nombre de Peclet et le nombre de Reynolds ont été retenus parmi les différents paramètres calculés par Qtracer2.

- Le nombre de Peclet

Ce nombre adimensionnel est une mesure de la contribution relative des phénomènes de convection et de dispersion-diffusion dans le transport de soluté (Schiesser & Silebi, 1997). Un nombre de Peclet inférieur à 0,4 indique un contrôle du phénomène de diffusion. Une valeur entre 0,4 et 6 indique que l'on est dans la transition entre diffusion et convection et que les deux processus sont relativement égaux. Un nombre de Peclet supérieur à 6,0 indique un transport dominé par la convection (Fetter, 1999). En milieu karstique, ce nombre est la plupart du temps bien supérieur à 6,0. L'équation **(14)** donne la valeur du nombre de Peclet à partir de la dispersion et de la vitesse moyenne du traceur.

$$PN = \frac{\bar{v}x}{D_x} \quad (14)$$

- Le nombre de Reynolds

Il est également adimensionnel et permet de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent. Un nombre de Reynolds inférieur à 500 signifie que l'écoulement est laminaire et que les forces de viscosité prédominent. Une valeur supérieure à 2 000 suggère un écoulement turbulent où il existe des échanges latéraux et verticaux entre les veines liquides (Bravard & Petit, 1997 in Bonnier 2011). Le nombre de Reynolds est donné par l'équation **(15)** :

$$RN = \frac{\rho \bar{v} D_c}{\nu} \quad (15)$$

II.3. Description et résultats des nouveaux essais de traçage (2008-2013)

Entre 2008 et 2013, neuf essais de traçage ont été réalisés par l'Université de Namur sur le site de Furfooz. Un récapitulatif du dispositif mis en place pour chacun de ces traçages est repris au **Tableau II-2** ainsi qu'à la **Figure II-4**. Pour chacun des traçages réalisés, les différentes courbes de restitution sont présentées graphiquement tandis que les résultats (temps, vitesses, paramètres hydrodispersifs) calculés avec Qtracer2 sont commentés et synthétisés dans le **Tableau II-3**.

Traçage	Date	Injection	Traceur	Equipement				Débit (l/sec)*
				TQF	PDV	GDS	TDL	
1	11/06/08	GDS	25g Rhod.				F	13,3
2	11/06/08	TQF	100g Ura.		E	F	F	
3	04/08/08	PDV	200g Ura.		E	F	F	7,2
4	04/08/08	PDV	200g Rhod.		E	F	F	
5	23/08/12	Nutons	200g Ura.	F	F	F	F	4,6
6	26/03/13	Nutons	200g Rhod.	F	F	F	F	19,0
7	27/03/13	GDS	20g Ura.				F	22,0
8	29/03/13	PDV	200g Ura.			F	F	18,0
9	19/04/13	Nutons	200g Ura.		F	F	F	10,5

Tableau II-2 : Récapitulatif du dispositif mis en place pour les traçages quantitatifs – F : fluorimètre automatique, E : échantillonneur automatique, TQF : Trou qui Fume, PDV : Puits des Vaux, GDS : Galerie des Sources, TDL : Trou de la Loutre, *Débit moyen mesuré à la Galerie des Sources, Ura : uranine, Rhod : rhodamine.

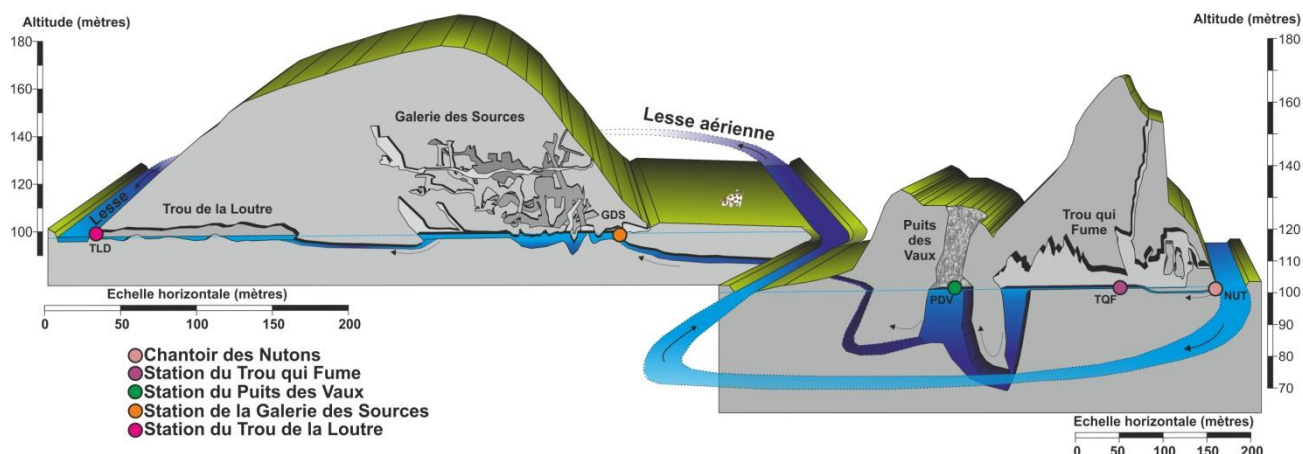


Figure II-4 : Localisation des différentes stations utilisées lors des 9 essais de traçage quantitatifs.

II.3.1. Traçage n°1 (11 juin 2008)

Le premier traçage, entre la Galerie des Sources et le Trou de la Loutre, est venu confirmer les observations des traçages historiques. Ce traçage a été réalisé en période de basses eaux avec un débit mesuré à 13,3 litres/seconde à la Galerie des Sources. La courbe de restitution de la rhodamine est présentée à la **Figure II-5**.

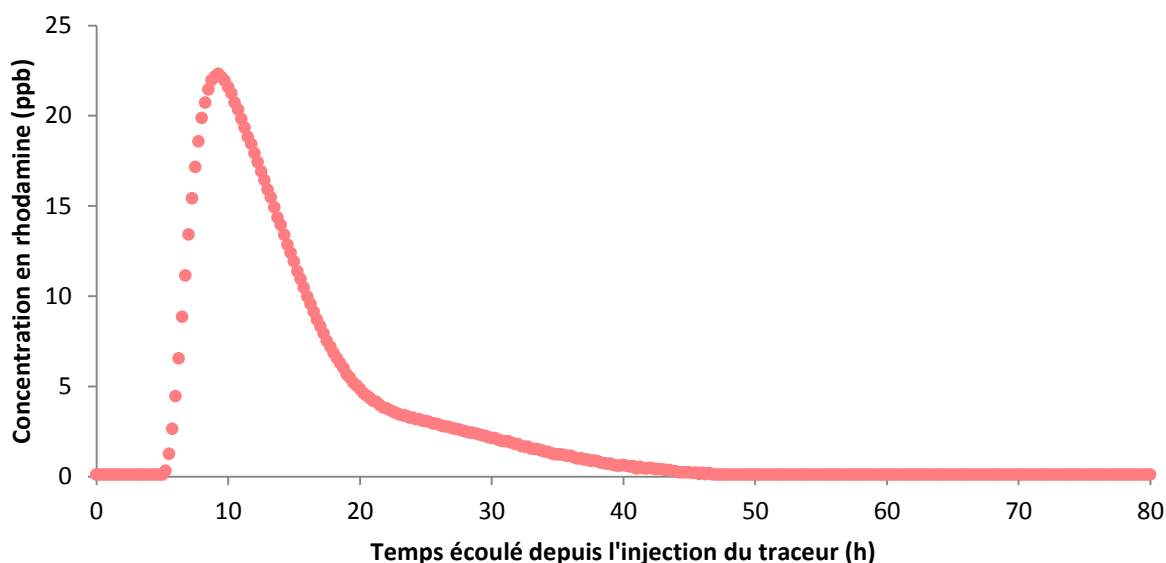


Figure II-5 : Traçage n°1 – Courbe de restitution de la rhodamine au Trou de la Loutre.

La courbe de restitution de ce traçage présente les caractéristiques d'un système où le transport est dominé par la convection, c'est-à-dire une allure symétrique, étroite, avec peu d'effets de retard. Les données de vitesses sont typiques d'un milieu de type rivière ou conduit karstique. Le nombre de Peclet de 13,1 indique que le processus de transport est dominé par la convection. Le nombre de Reynolds de 9 910 permet de caractériser l'écoulement comme turbulent (Bravard & Petit, 1997 in Bonniver, 2011). Le dimensionnement de la zone d'écoulement pour un débit de 13,3 l/sec donne une valeur cohérente avec les observations de terrain, soit une section de 1,76 m².

II.3.2. Traçage n°2 (11 juin 2008)

La seconde injection avait pour but de tracer la quasi-totalité du système, depuis la galerie du Trou qui Fume, jusqu'à la résurgence du Trou de la Loutre. La **Figure II-6** présente les courbes de restitution mesurées aux différents points d'échantillonnage. Cette injection s'est déroulée dans les mêmes conditions que le traçage n°1.

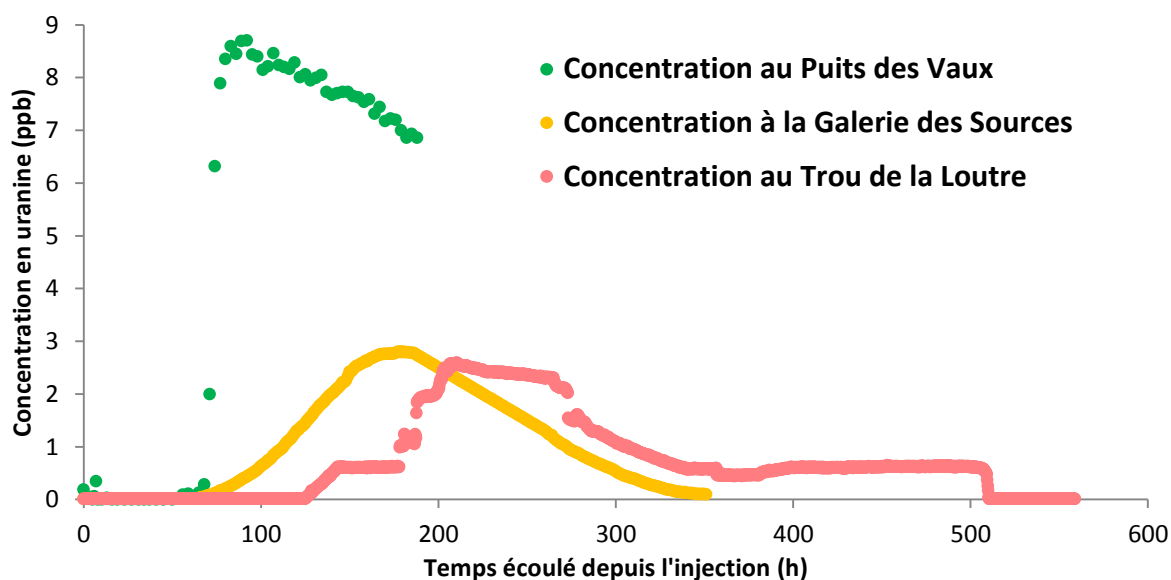


Figure II-6 : Traçage n°2 - Courbes de restitution de l'uranine au Puits des Vaux, à la Galerie des Sources et du Trou de la Loutre.

Les résultats de ce traçage montrent l'influence de la vaste zone noyée entre le Trou qui Fume et le Puits des Vaux. La vitesse du traceur au Puits des Vaux est très faible, et ce, malgré un trajet court dont une majeure partie est constituée d'une rivière souterraine avérée. L'arrivée brusque du traceur au Puits des Vaux suivie de sa lente disparition pourrait être le résultat d'une chasse brusque du système siphonnant. L'arrivée massive du traceur serait ensuite diluée lentement par le faible débit entrant dans le Puits des Vaux. Les caractéristiques calculées par Qtracer2 (section de 27,9 m², faible dispersivité longitudinale) semblent cohérentes avec le milieu observé : un transport très lent et peu dispersif dans une section d'écoulement très large. Le nombre de Peclet indique que le processus de transport est dominé par la convection. Le nombre de Reynolds (2 493) permet de caractériser l'écoulement comme turbulent (Bravard & Petit, 1997 in Bonniver, 2011).

Les restitutions mesurées à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre sont assez comparables avec des vitesses de transit similaires. Les caractéristiques de l'écoulement entre le Puits des Vaux et le Trou de la Loutre semblent donc relativement constantes. Les nombres de Peclet (26 et 29) indiquent que le processus de transport est dominé par la convection. Les nombres de Reynolds (3 587 et 3 724) permettent de caractériser l'écoulement comme turbulent (Bravard & Petit, 1997 in Bonniver, 2011). La géométrie du conduit semble également rester constante avec une section moyenne de 13,5 m² et 12,5 m². Rappelons qu'il s'agit là d'une moyenne de la géométrie du conduit sur tout le tronçon considéré depuis le Chantoir des Nutons.

II.3.3. Traçage n°3 (4 août 2008)

Une seconde campagne de traçages a été réalisée en période de basses eaux (7,2 litres/seconde à la Galerie des Sources), durant le mois d'août 2008. L'objectif était de se concentrer sur les phénomènes régissant le transport entre le Puits des Vaux et le second recouplement de méandre (Galerie des Sources et Trou de la Loutre). Le traçage n°3 a consisté en une injection d'uranine dans le Puits des Vaux, au centre de la masse d'eau. La **Figure II-7** présente les courbes de restitution mesurées à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

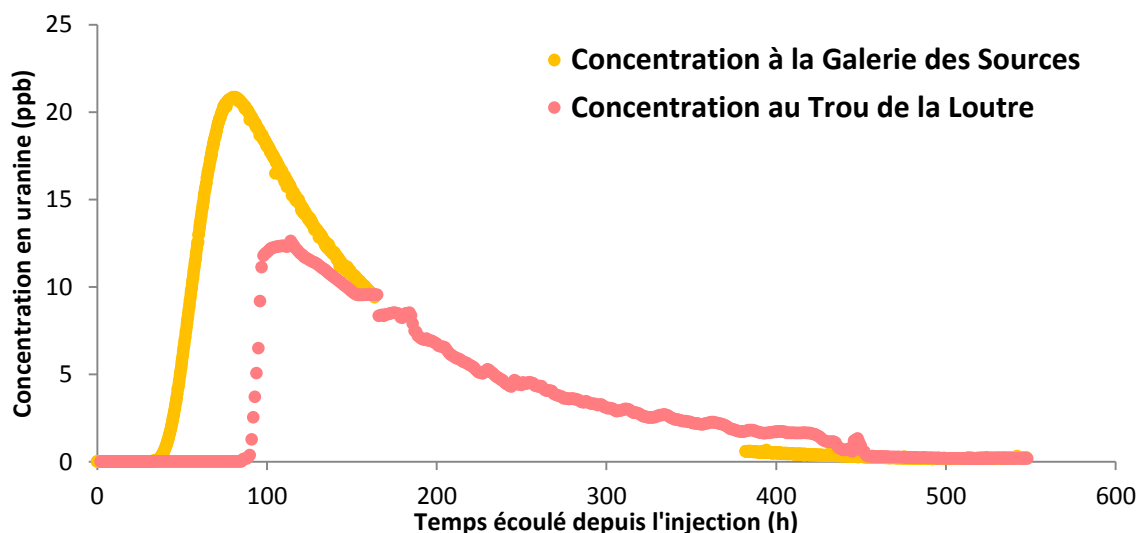


Figure II-7 : Traçage n°3 - Courbes de restitution de l'uranine à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

II.3.4. Traçage n°4 (4 août 2008)

Ce traçage a également consisté en une injection au Puits des Vaux, mais dans la partie extrême gauche de la masse d'eau (soit le plus en aval possible). Le traceur utilisé était de la sulphorhodamine B et les conditions de débits étaient identiques à celles du traçage n°3. La **Figure II-8** présente la courbe de restitution de la rhodamine à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

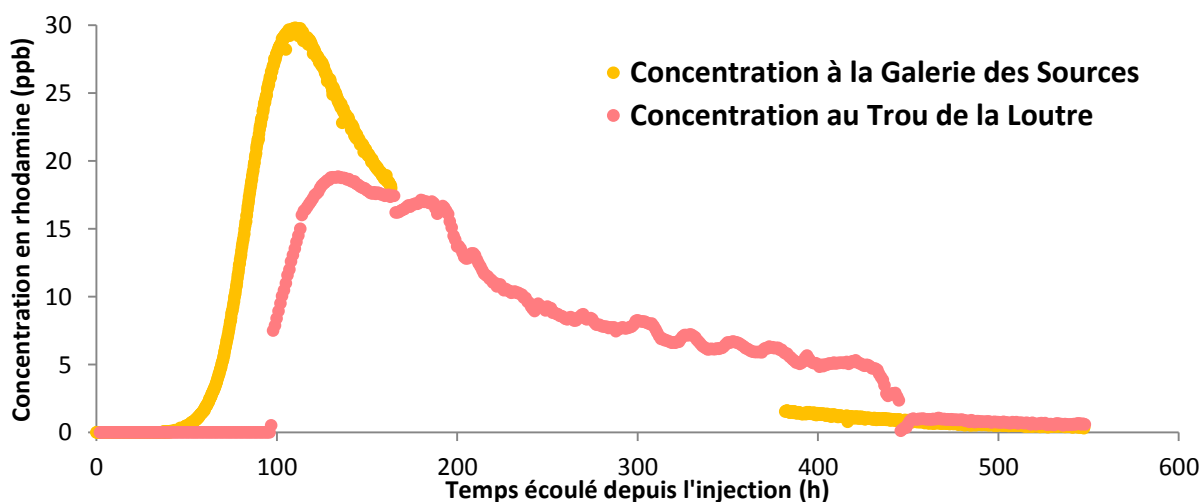


Figure II-8 : Traçage n°4 - Courbes de restitution de la rhodamine à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

Lors de ces traçages, un problème de fluorimètre s'est présenté à la Galerie des Sources entre 160 h et 280 heures après l'injection. Le fluorimètre automatique y a cessé de fonctionner suite à une défaillance technique. Les données manquantes ont cependant facilement été interpolées.

Pour ces deux traçages, les vitesses moyennes sont de l'ordre de 2,5 à 4 m/h, ce qui, compte tenu d'un débit de 7,2 l/sec, est cohérent avec les vitesses observées lors du traçage 2. Ce dernier montrait une augmentation de la vitesse moyenne dans les sections PDV-GDS et GDS-TDL, augmentation également observée pour ces deux injections. Les nombres de Peclet indiquent que le processus de transport est dominé par la convection. Les nombres de Reynolds permettent de caractériser l'écoulement comme turbulent (Bravard & Petit, 1997 in Bonniver, 2011).

Qtracer2 a estimé la section d'écoulement à 8 – 10 m² pour le tronçon PDV-GDS et 6 – 7 m² pour le trajet total, ce qui est cohérent avec une section plus réduite dans la seconde partie (GDS-TDL) comme indiqué par le traçage 1. C'est ce changement de section qui induit une augmentation de vitesse (pour un même débit) dans la seconde partie du tracé.

II.3.5. Traçage n°5 (23 août 2012)

Un équipement complet du système a été mis en place en août 2012 afin de réaliser un traçage en situation d'étiage de la Lesse. Malheureusement, les résultats ont été, dans une large mesure, faussés par des ennuis techniques au niveau des fluorimètres. Une seule courbe de restitution a donné entière satisfaction, elle est présentée à la **Figure II-9**.

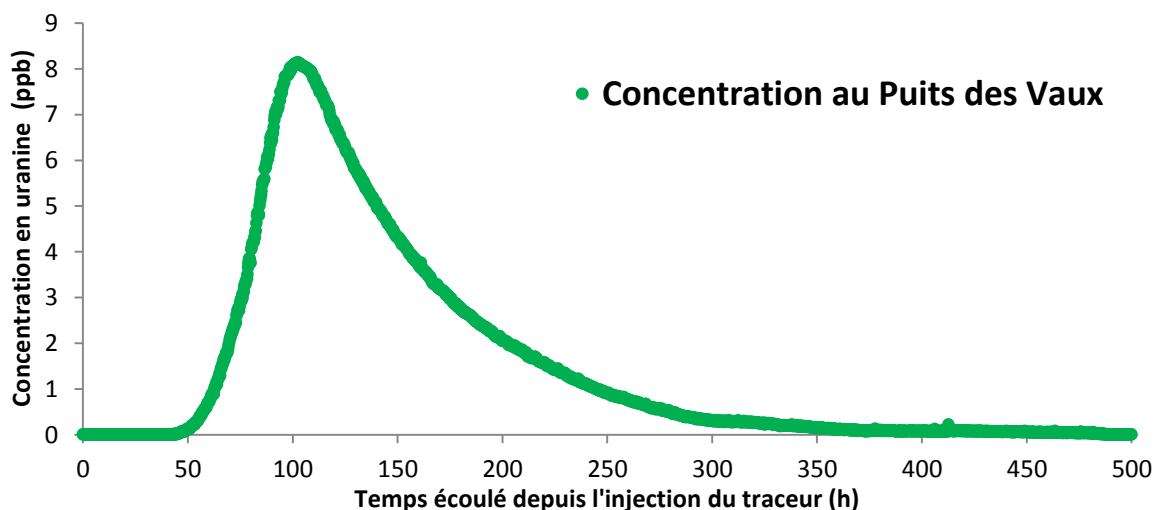


Figure II-9 : Traçage n°5 - Courbe de restitution de l'uranine au Puits des Vaux.

Les résultats de ce traçage sont comparables avec ceux du traçage 2. Le transport y est particulièrement lent ($V_{\text{moy}} = 2,1 \text{ m/h}$) du fait de l'influence de la zone noyée TQF-PDV. Le nombre de Peclet de 22,0 indique que le processus de transport est dominé par la convection. Le nombre de Reynolds de 1 606 permet de caractériser l'écoulement comme transitoire entre turbulent (plus de 2 000) et laminaire (moins de 500) (Bravard & Petit, 1997 in Bonniver, 2011).

La différence en termes de géométrie de la zone d'écoulement est cependant notable entre les traçages 2 et 5 (section de 27,9 et 8,0 m² respectivement). Deux éléments peuvent expliquer cela :

- la différence notable de débit entre le traçage n°2 (13,3 l/sec) et celui-ci (4,6 l/sec) ;
- la prise en compte du tronçon de 80 mètres entre le Chantoir des Nutons et le Trou qui Fume dans cette expérience. Ce tronçon, en toute vraisemblance, possède les mêmes caractéristiques que la rivière souterraine du Trou qui Fume (section très réduite et écoulement convectif).

Le temps de transit dans le cas de ce traçage est bien supérieur à celui observé en 1902 (43 h pour seulement 17 h 30 en 1902). Les conditions totalement différentes (hautes eaux en 1902 – basses eaux en 2012) expliquent facilement cet état de fait. De plus, l'hypothèse de l'influence de la zone siphonnante entre le Trou qui Fume et le Puits des Vaux peut à nouveau être avancée pour expliquer la longue période de transit du traceur.

II.3.6. Traçage n°6 (26 mars 2013)

Suite à l'échec du traçage d'août 2012, une nouvelle injection a été réalisée en mars 2013 avec le même équipement. Les conditions de débits étaient bien supérieures à celles d'août avec une moyenne de 19,0 litres/sec à la Galerie des Sources. La **Figure II-10** présente les courbes de restitution de la rhodamine aux quatre stations d'échantillonnages du réseau.

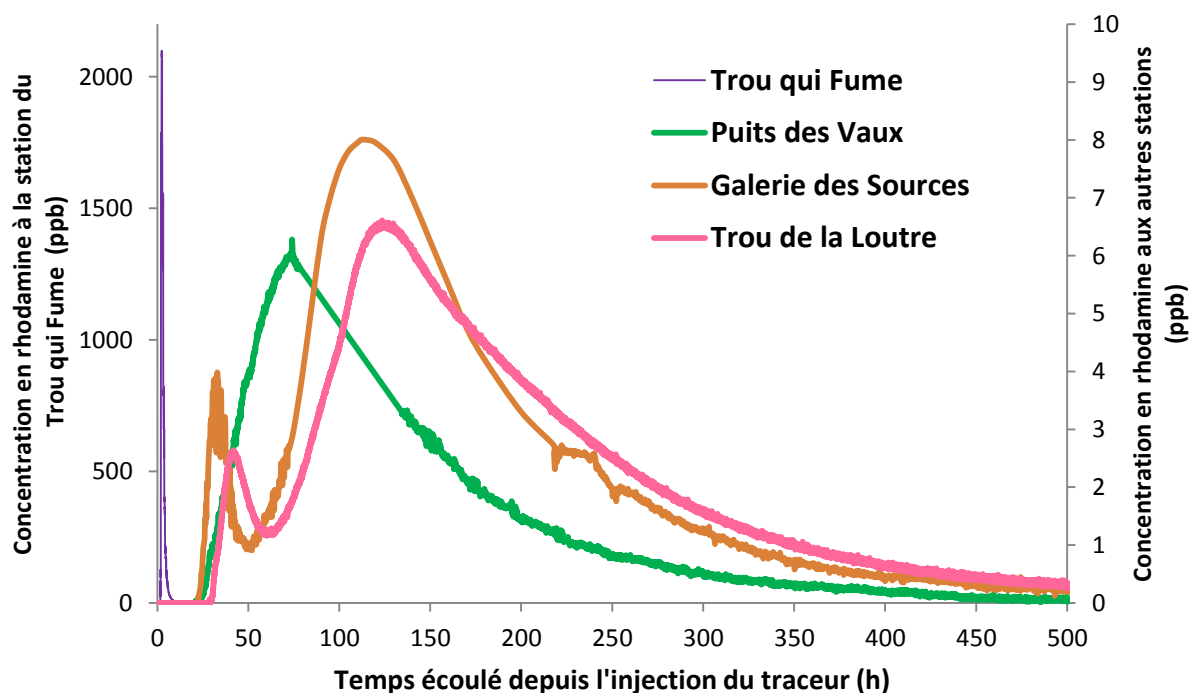


Figure II-10 : Traçage n°6 - Courbes de restitution de la rhodamine au Trou qui Fume, au Puits des Vaux, à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

Ce traçage a donné des résultats semblables aux précédents en termes de caractéristiques d'écoulement et de géométries, compte tenu du débit plus élevé (19,0 l/sec). Cependant, il diffère de par l'allure des courbes de restitution mesurées à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

Le trajet jusqu'au Trou qui Fume montre un transport rapide ($V_{\text{moy}} = 34,4 \text{ m/h}$) dominé par la convection, sans effets de retard et très peu dispersif. La section d'écoulement calculée à $1,92 \text{ m}^2$ est cohérente avec les observations de la section sur le terrain lors du traçage.

La restitution au Puits des Vaux montre des vitesses très réduites ($V_{\text{moy}} = 2,3 \text{ m/h}$) et une section d'écoulement très large ($28,9 \text{ m}^2$) comme c'était le cas lors du traçage n°2. Le nombre de Peclet (5,2) montre un transport moins convectif et donc plus sujet à la diffusion.

L'analyse par Qtracer2 des courbes de la Galerie des Sources et du Trou de la Loutre montre également un transport dominé par la convection et turbulent. Les sections d'écoulement calculées sont cohérentes avec celles du traçage n°2 ($14,9 \text{ m}^2$ et $11,1 \text{ m}^2$ respectivement). La double arrivée de traceur à la Galerie des Sources est l'un des éléments les plus intéressants. Une division du nuage de traceur ne peut refléter que deux processus :

- une difffluence majeure du cours souterrain suivie d'une confluence avant l'arrivée à la Galerie des Sources ;
- une séparation du nuage de traceur par des processus d'écoulements différentiels.

La première hypothèse a été réfutée après avoir établi le raisonnement suivant :

- toutes les injections au Puits des Vaux (traçages n°3, 4 et 8), quelles que soient les conditions hydrologiques, ont donné une seule restitution à la Galerie des Sources. Si difffluence il y a, elle doit donc se trouver à l'amont du Puits des Vaux ;
- aucune difffluence n'est observée dans le Trou qui Fume et dans son lac, l'ensemble du flux semble emprunter la zone siphonnante dans le fond du lac (*cf. Topographie du Trou qui Fume*). Si difffluence il y a, elle doit se trouver dans cette zone siphonnante, entre le lac du Trou qui Fume et le Puits des Vaux ;
- une difffluence en zone siphonnante serait active quelles que soient les conditions hydrologiques. Or aucun double pic n'a été enregistré pour l'injection au Trou qui Fume dans des conditions de basses eaux (traçage n°2).

Il semble donc que l'existence d'une difffluence du cours souterrain soit exclue. La seule possibilité reste une séparation du nuage de traceur par des effets hydrodynamiques et plus particulièrement par un effet capacitif causé par un volume d'eau immobile important.

Une telle séparation ne serait pas incompatible avec le comportement de la vaste zone noyée du Puits des Vaux. En effet, celle-ci semble constituer un système capacitif annexe au drain principal. Dès lors, le modèle conceptuel proposé est une division du nuage de traceur entre une zone convective rapide (le drain principal) et une zone diffusive plus lente (volume noyé annexe), jouant le rôle de système capacitif (*Figure II-11*).

Partant de ce postulat et d'après les résultats de ce traçage, il apparaît que la courbe enregistrée au Puits des Vaux n'est pas représentative du comportement de l'écoulement souterrain. Ce point d'échantillonnage refléterait plutôt le comportement du système annexe au drain principal. Si l'on s'en tient à l'hypothèse de l'existence d'un système

capacitif distinct de l'écoulement convectif, la courbe du Puits des Vaux représente un échantillonnage dans une zone d'emménagement temporaire du système.

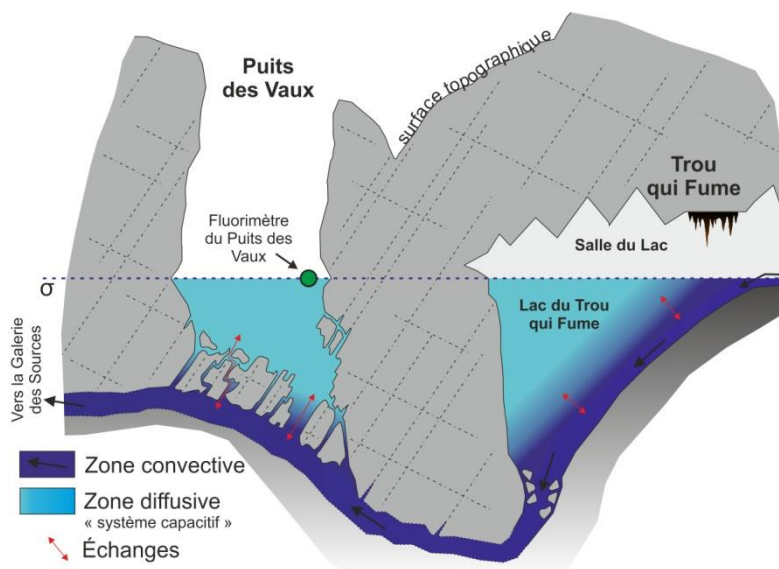


Figure II-11 : Schéma conceptuel du double processus de transport affectant la zone noyée TQF - PDV (schéma sans échelle).

Une dernière observation vient étayer la théorie d'un double processus de transport. Lors du traçage n°2, la différence de temps de première arrivée entre le Puits des Vaux et la Galerie des Sources était de seulement 5 heures. Lors du traçage n°3, le traceur a pris 32 h 15 au minimum pour effectuer ce trajet. Cela montre clairement que lorsque le traceur est injecté à l'amont du Puits des Vaux, une partie de celui-ci est emportée rapidement via le drain principal sans remonter vers la surface du Puits. Au contraire, lorsque l'injection est réalisée dans le Puits des Vaux, l'effet du système capacitif augmente considérablement le temps de parcours.

La suite du système (Galerie des Sources – Trou de la Loutre) ne modifie pas l'aspect de la courbe de restitution montrant 2 nuages de traceurs. On retrouve donc bien un système d'écoulement convectif plus « classique », comme cela a été démontré par plusieurs traçages antérieurs.

Ce modèle conceptuel sera largement utilisé dans la suite de ce travail puisque l'un des objectifs sera de prendre en compte ce double processus de transport et de le caractériser au niveau de ses dimensions et de ses paramètres d'écoulement.

II.3.7. Traçage n°7 (27 mars 2013)

Ce traçage consistait en une injection à la Galerie des Sources en période de moyennes eaux (débit moyen de 22,0 litres/seconde à la Galerie des Sources). L'objectif était de tracer le tronçon « Galerie des Sources – Trou de la Loutre » dans des conditions de débit différentes de celles du traçage n°1. La **Figure II-12** présente la courbe de restitution mesurée au Trou de la Loutre.

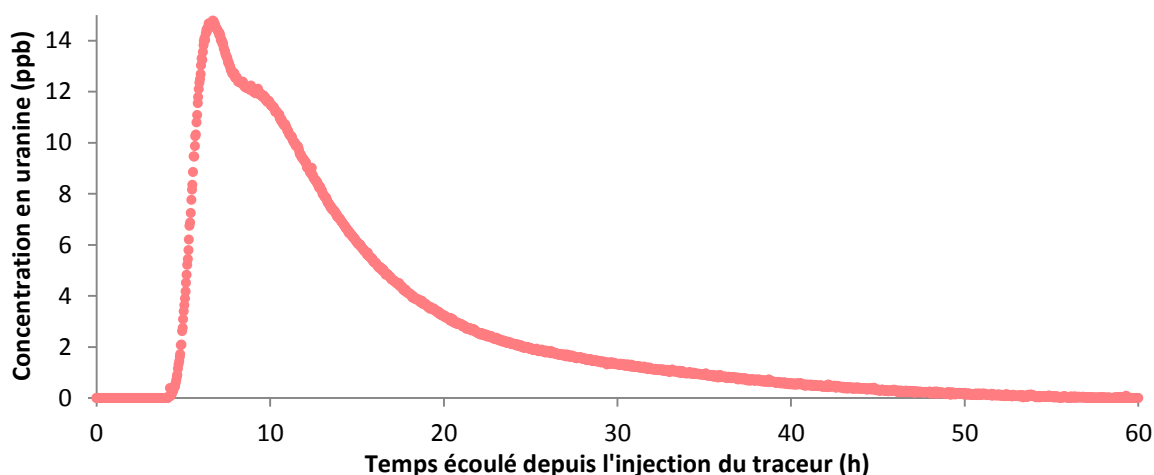


Figure II-12 : Traçage n°7 - Courbe de restitution de l'uranine au Trou de la Loutre.

La courbe de restitution du traçage n°7 présente les mêmes caractéristiques que celle du traçage n°1. On a donc un transport dominé par la convection avec des vitesses rapides ($V_{\text{moy}} = 27,0 \text{ m/h}$) et peu d'effets de retard.

La comparaison de la géométrie de la zone d'écoulement avec celle du traçage n°1 montre que pour un pourcentage donné d'augmentation de débit (13,3 l/sec et 22,0 l/sec respectivement), le même pourcentage d'augmentation de la section d'écoulement est observé (1,76 m² et 2,93 m² respectivement). Ceci montre la cohérence des résultats de Qtracer2 pour ces deux traçages.

II.3.8. Traçage n°8 (29 mars 2013)

Pour ce traçage, l'uranine a été injectée à l'extrémité aval du Puits des Vaux à l'aide d'un tuyau pour tenter de minimiser la dilution du traceur dans la masse d'eau du Puits des Vaux. Le débit moyen a été considéré à 18,0 litres/seconde à la Galerie des Sources. Suite à un mauvais positionnement du fluorimètre, le pic principal de restitution n'a pas été enregistré à la Galerie des Sources. La seule courbe de restitution enregistrée est donc celle du Trou de la Loutre (**Figure II-13**).

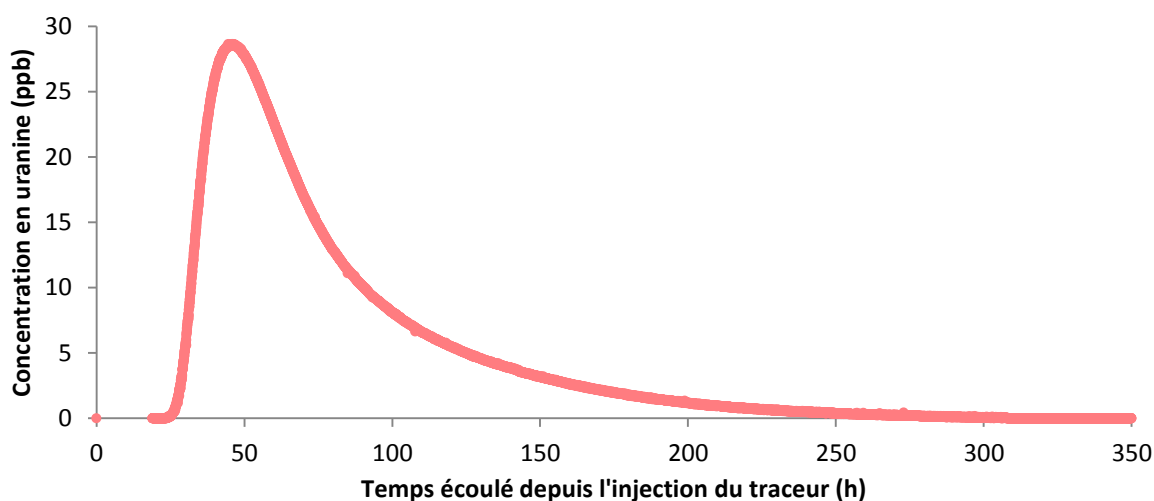


Figure II-13 : Traçage n°8 - Courbe de restitution de l'uranine au Trou de la Loutre.

Ce traçage a permis de démontrer en partie l'hypothèse du double transport dans le Puits des Vaux. Le traceur a été injecté à l'aide d'un long tuyau à l'extrémité nord du Puits des Vaux afin de tenter de limiter sa dispersion dans la masse d'eau. Ce faisant, l'uranine n'a mis que 23 h 30 pour rejoindre le Trou de la Loutre. Cette valeur est bien inférieure à celles des traçages n°3 et n°4 durant lesquels les deux traceurs ont mis respectivement 86 et 97 h pour faire le même trajet. Un effet de débit est certainement possible, mais la différence est trop importante pour être uniquement expliquée par les conditions hydrologiques. La concentration maximale est également fortement différente (12,6 ppb, 18,8 ppb et 28,6 ppb). Ceci va à l'encontre d'un phénomène éventuel de dilution par augmentation du débit. Dans ce cas, c'est bien la dilution du traceur dans la masse d'eau du Puits des Vaux lors des traçages n°3 et 4 qui est en cause.

Les autres paramètres sont sensiblement équivalents entre les traçages 3, 4 et 8. La section d'écoulement varie entre 6,12 et 7,15 m² tandis que le nombre de Peclet varie entre 9,9 et 12,6. Ceci montre que les caractéristiques hydrodynamiques du tronçon varient peu selon les conditions de débit et que c'est bien l'effet du double processus de transport qui est responsable de la différence de temps de transit.

II.3.9. Traçage n°9 (19 avril 2013)

Afin de confirmer les résultats du traçage n°6 et d'avoir des données de meilleure qualité, une injection de 200 g d'uranine a été réalisée en avril 2013 au Chantoir des Nutons. Les conditions de débit étaient en baisse par rapport aux précédents traçages avec une moyenne de 10,5 litres/seconde à la Galerie des Sources pendant les 300 premières heures de l'injection. La **Figure II-14** présente les courbes de restitution de l'uranine mesurées au Puits des Vaux, à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

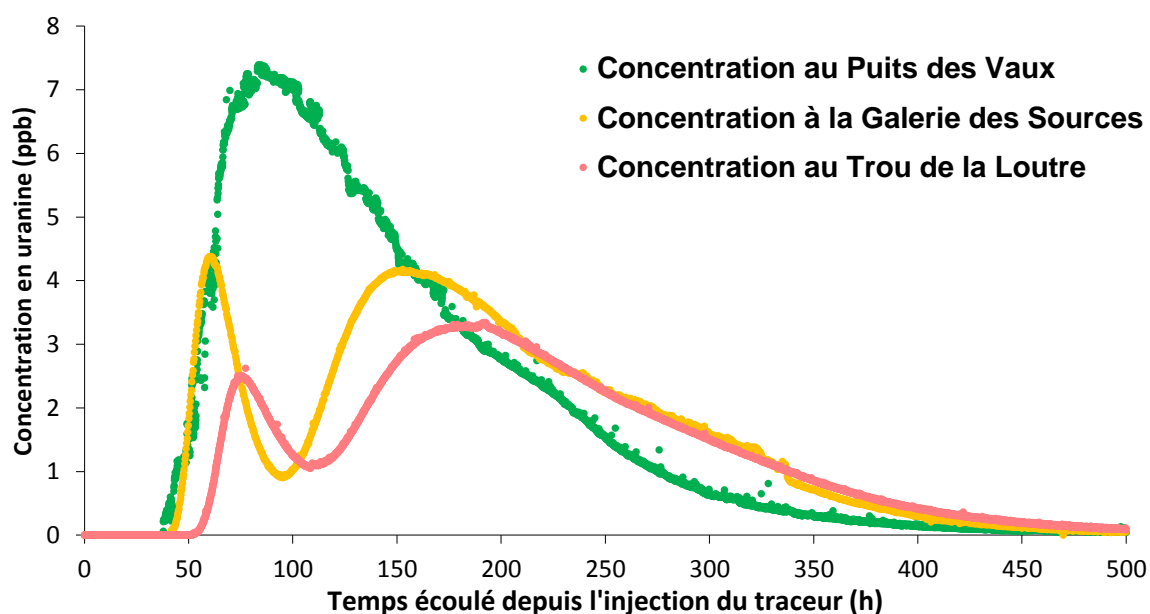


Figure II-14 : Traçage n°9 - Courbes de restitution de l'uranine au Puits des Vaux, à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

Ce traçage a donné d'excellents résultats à chacune des stations. Il est comparable en tous points avec le traçage n°6, si ce n'est que le débit était sensiblement inférieur (10,5 litres/sec contre 19,0 litres/sec). Cette diminution de débit est bien marquée dans les résultats calculés par Qtracer2 :

- diminution des vitesses de transit ;
- diminution des sections et volumes d'écoulement.

Ce traçage vient confirmer les résultats du traçage n°6 ainsi que le modèle conceptuel de double processus de transport dans la zone noyée du Puits des Vaux. On observe cependant quelques différences au niveau des formes et concentrations maximales atteintes par les courbes de restitution. La courbe du Puits des Vaux montre une concentration nettement supérieure aux autres courbes, ce qui n'était pas le cas lors du traçage n°6. En corollaire à cela, les courbes secondaires de la Galerie des Sources et du Trou de la Loutre sont plus émoussées et nettement plus asymétriques que lors du traçage n°6. Finalement, les caractéristiques des courbes primaires de la Galerie des Sources et du Trou de la Loutre ne semblent pas avoir été sensiblement affectées.

Il semble donc que la diminution de débit n'ait pas eu d'effet majeur sur le double processus de transport en lui-même. Par contre, il apparaît que la dynamique au sein des deux « zones » de transport est affectée. Ainsi, la concentration plus élevée au Puits des Vaux semble être un effet de la diminution de débit. Parallèlement, les courbes secondaires de la Galerie des Sources et du Trou de la Loutre indiquent que le second nuage de traceur a subi une diffusion plus importante. Celle-ci a pu être entraînée par un « taux de renouvellement » plus faible dans la zone noyée en raison de la baisse de débit. Notons que les taux de restitution sont bien en deçà de ceux mesurés lors du traçage n°6. Ceci montre qu'un temps de séjour et une diffusion plus importante ont permis la « perte » d'une plus grande proportion du traceur dans le réseau.

Il reste néanmoins à discuter le fait que le traçage n°2 n'ait pas montré de double restitution, malgré un débit intermédiaire entre les traçages n°6 et n°9. Cela pose la question des conditions pour lesquelles ce « double transport » est actif. Il serait tout à fait imaginable d'avoir un effet convectif réduit suite à une baisse de débit. Ceci induirait un ralentissement de l'ensemble du nuage de traceur et la restitution sous la forme d'une seule courbe « lente ». Dans ce cadre, la mise en œuvre de nouveaux essais de traçage pour des conditions de débit variées permettra, sans aucun doute, de préciser s'il existe un lien entre le débit du système et son impact sur la restitution du traceur.

Le **Tableau II-3**, ci-après, reprend une synthèse complète des données des différents essais de traçage réalisés dans le système de la Lesse souterraine de Furfooz.

Période	Traçage n°	Injection	Trac. (g)	Q (l/sec)	S.E	Dist. (m)	T _{AP} (h)	T _{Mod} (h)	T _{Moy} (h)	V _{max} (m/h)	V _{mod} (m/h)	V _{moy} (h)	C _{max} (ppb)	a _L (m)	D _L (m²/ sec)	TR (%)	AI	V (m³)	A (m²)	PN	RN
Juin 2008	1	GDS	Rh25	13,3	TDL	400	5,25	9,25	14,7	76,2	43,2	27,2	22,3	30,5	0,23	45,3	0,5	705	1,76	13,1	9910
	2	TQF	Ur 100		PDV	220	56	92	128	3,9	2,4	1,7	8,7	2,7	0,0013	43,7	0,56	6132	27,9	82,3	2493
					GDS	690	61	178	194	11,3	3,9	3,5	2,8	26,3	0,026	18,2	0,82	9290	13,5	26,3	3587
					TDL	1090	124,25	210,75	284,5	8,7	5,3	3,8	2,6	37,1	0,039	19,1	0,8	13621	12,5	29,4	3724
Août 2008	3	PDV	Ur 200	7,2	GDS	450	32,25	81,25	146,7	14,0	5,6	3,1	20,9	53,3	0,045	32,7	0,67	3801	8,45	8,4	2952
	TDL				850	86	114	206,9	9,9	7,5	4,1	12,6	85,9	0,098	23,8	0,76	5362	6,39	9,9	2837	
	4		Rh 200		GDS	450	37	110,25	174,8	12,2	4,1	2,6	29,8	29,5	0,021	48,7	0,51	4532	10,1	15,2	2245
					TDL	850	97	134	234,3	8,8	6,3	3,6	18,8	76,2	0,077	46,1	0,53	6074	7,15	11,2	2665
Août 2012	5	Nutons	Ur 200	4,6	PDV	300	43	102,5	145,4	7,0	2,9	2,1	8,1	13,6	0,0078	6,33	0,94	2409	8,03	22,0	1606

Période	Traçage n°	Injection	Trac. (g)	Q (l/sec)	S.E	Dist. (m)	T _{AP} (h)	T _{Mod} (h)	T _{Moy} (h)	V _{max} (m/h)	V _{mod} (m/h)	V _{moy} (h)	C _{max} (ppb)	a _L (m)	D _L (m²/ sec)	TR (%)	AI	V (m³)	A (m²)	PN	RN
Mars 2013	6	Nutons	Rh 200	19,0	TQF	110	1,53	2,43	3,19	71,7	45,2	34,4	2099	1,58	0,015	100	0	211	1,92	69	13107
					PDV	310	21,0	74,4	135,6	14,7	4,2	2,3	6,1	59,1	0,038	24,4	0,76	8950	28,9	5,2	3376
					GDS	770	22,0	112,0	168,0	35,0	6,9	4,6	8,0	110,0	0,14	39,9	0,60	11492	14,9	7,0	4868
					TDL	1170	28,75	124,15	190,0	40,7	9,4	6,2	6,5	148,5	0,254	37,3	0,63	12996	11,1	7,9	5642
	7	GDS	Ur 20	22,0	TDL	400	4,13	6,7	14,8	96,8	59,7	27,0	14,8	75,2	0,56	63,5	0,36	1172	2,93	5,3	12722
	8	PDV	Ur200	18,0	TDL	850	23,5	46	80,4	36,2	18,5	10,6	28,6	67,5	0,198	54,1	0,46	5210	6,12	12,6	6760
Avril 2013	9	Nutons	Ur 200	10,5	PDV	310	37,9	83,7	150,5	8,17	3,7	2,1	7,4	46,4	0,026	18,6	0,81	5687	18,35	6,7	2426
					GDS	770	40,5	60,0	192,8	19,0	12,8	4,0	4,4	83,9	0,093	15,1	0,85	7289	9,47	9,2	3378
					TDL	1170	51,8	192,0	218,4	22,6	6,1	5,4	3,3	117,4	0,175	12,6	0,87	8255	7,05	10,0	3912

Tableau II-3 : Résultats des 9 traçages quantitatifs calculés avec Qtracer2 (Field, 2002) – Trac : substance traçante, Q : débit, S.E. : site d'échantillonnage, Dist. : distance, T_{AP} : temps d'arrivée première, T_{Mod} : temps modal, T_{Moy} : temps moyen de transit, V_{max} : vitesse maximale, V_{mod} : vitesse modale, V_{moy} : vitesse moyenne, C_{max} : concentration maximale, a_L : dispersivité longitudinale, D_L : coefficient de dispersion longitudinale, TR : taux de restitution, AI : accuracy index, V : volume d'écoulement, A : section d'écoulement, PN : nombre de Peclet, RN : nombre de Reynolds.

II.4. Conclusions de la campagne de traçages et de la calibration Qtracer2

La réalisation, entre 2008 et 2013, d'une série de neuf essais de traçage sur le site de la Lesse souterraine de Furfooz a permis une quantification de nombreux paramètres d'écoulement et de transport propres au système karstique. Dans ce cadre, l'utilisation du logiciel d'analyse de courbes de restitution Qtracer2 (Field, 2002) a fourni un calcul rapide et fiable des résultats des différents essais de traçage.

Le système souterrain de la Lesse présente majoritairement des caractéristiques de type rivière. La convection y est le processus d'écoulement principal et les vitesses de transport y sont caractéristiques d'un écoulement de type conduit karstique. Cependant, la zone noyée située entre le lac du Trou qui Fume et le Puits des Vaux semble montrer des caractéristiques d'écoulement sensiblement différentes. Le transport y est nettement plus lent et diffusif. Les chroniques limnimétriques et de conductivité ont également démontré que cette zone avait plutôt le comportement d'un vaste volume d'eau immobile au temps de séjour prolongé, annexé au drain principal.

Les essais de traçage n°6 et 9 ont tous deux montré une division du nuage de traceur. Ce phénomène a été identifié comme la conséquence d'un important effet d'eau immobile induit par le système annexe au drain d'écoulement principal. Le lien entre le débit du système et ce fonctionnement particulier n'a pas encore pu être précisé. Un modèle conceptuel, proposant un double processus de transport au niveau du Puits des Vaux, a ainsi été élaboré pour expliquer le fonctionnement de l'écoulement. L'objectif dans la suite de ce travail est la modélisation de l'écoulement souterrain, partant de ce modèle conceptuel.

En ce qui concerne le dimensionnement de la zone d'écoulement, Qtracer2 a permis d'obtenir une série d'estimations, reprises dans le **Tableau II-3**. Bien qu'une distinction puisse être faite entre les conditions de hautes eaux et de basses eaux, les estimations de sections et de volumes calculées par Qtracer2 restent fort variables et un consensus s'avère peu évident entre ces différentes valeurs.

Le logiciel Qtracer2 s'avère fort utile pour une première analyse des résultats des courbes de restitution. Cependant, son inconvénient principal est qu'il ne permet pas de discrétiser l'espace à modéliser. Il est donc difficile d'analyser des résultats d'essais de traçage faisant intervenir différents milieux aux propriétés d'écoulement et de transport différentes, puisque Qtracer considère simplement les valeurs moyennes sur la totalité du trajet. La variabilité des estimations de dimensionnement des zones d'écoulement met en lumière les manquements de Qtracer à ce niveau. Il faut également noter que Qtracer2 n'est pas basé sur un modèle tenant compte des zones de stockage d'eau, tel que c'est le cas ici. Le modèle Qtracer ne peut donc pas prendre en compte les effets de vastes zones noyées ou de zones d'eau immobile sur la restitution du traceur. Les essais de traçage sur la totalité du système (tel que l'essai n°6 ou n°9) ne sont donc pas modélisables avec Qtracer2 et l'utilisation d'un logiciel plus complexe s'avère nécessaire. Dans ce cadre, le logiciel OTIS a été utilisé et les résultats de cette modélisation sont présentés dans le dernier chapitre de ce travail.

III. Modélisation des résultats des essais de traçage et dimensionnement du réseau karstique avec le logiciel OTIS

III.1. Introduction

Les informations apportées par les essais de traçage et la calibration des paramètres d'écoulement et de transport via Qtracer2 ont montré que le cours souterrain de la Lesse présente un tracé fort hétérogène. Deux types de comportements ont été distingués :

- les zones montrant un comportement de type rivière souterraine. C'est le cas des trajets « Chantoir des Nutons – lac du Trou qui Fume » et « Galerie des Sources – Trou de la Loutre » ;
- les zones montrant un comportement de type zone noyée. C'est le cas du trajet « lac du Trou qui Fume – Galerie des Sources ».

De plus, la campagne d'essais de traçage du printemps 2013 a fait apparaître que le tronçon « lac du Trou qui Fume – Puits des Vaux » agissait probablement comme un système capacitif, annexé au drain principal, retenant une partie du traceur et ralentissant son transit vers la suite du réseau.

L'objectif de ce travail de modélisation est donc double :

- dimensionner le système au complet sur base des essais de traçages. Ceci permettra d'évaluer la taille de la zone d'écoulement tout au long du système ;
- modéliser l'impact de la zone noyée sur la restitution du traceur, puisque celle-ci semble agir comme un système capacitif au sein du réseau.

Les données du traçage complet de mars-avril 2013 (n° 6) ont été choisies comme base pour la modélisation. Celles-ci ont l'avantage d'être disponibles pour chacune des stations et de présenter deux cas de double restitution (à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre).

Pour réaliser un modèle fiable, il a été nécessaire d'utiliser un outil de modélisation plus complexe. En effet, les résultats fournis par Qtracer2 sur base des essais de traçages sont globaux et représentent une moyenne des paramètres sur tout le système à l'amont du point d'échantillonnage. Afin de pouvoir tenir compte des caractéristiques hétérogènes d'un réseau tel que celui de Furfooz, il est nécessaire de discrétiser l'espace.

Le logiciel OTIS (Runkel, 1998) a été choisi afin de réaliser le dimensionnement précis du système ainsi que la caractérisation des paramètres d'écoulement et de transport. Ce logiciel est conçu pour modéliser l'écoulement et le transport en rivière et permet de discrétiser chaque type de milieu (rivière souterraine ou zone noyée) en vue d'un dimensionnement du réseau complet.

III.2. Essai de traçage modélisé

III.2.1. Résultats de l'essai de traçage

Les données expérimentales choisies pour la modélisation sont celles du traçage n° 6, réalisé en mars-avril 2013. Pour rappel, celui-ci consistait en une injection de 200 grammes de rhodamine au Chantoir des Nutons. Les quatre stations d'échantillonnage à l'aval avaient été équipées de fluorimètres automatiques (**Figure III-1**). La position exacte des stations d'échantillonnage est reprise dans chacune des topographies (cf. **Partie 2, Chapitre I**).

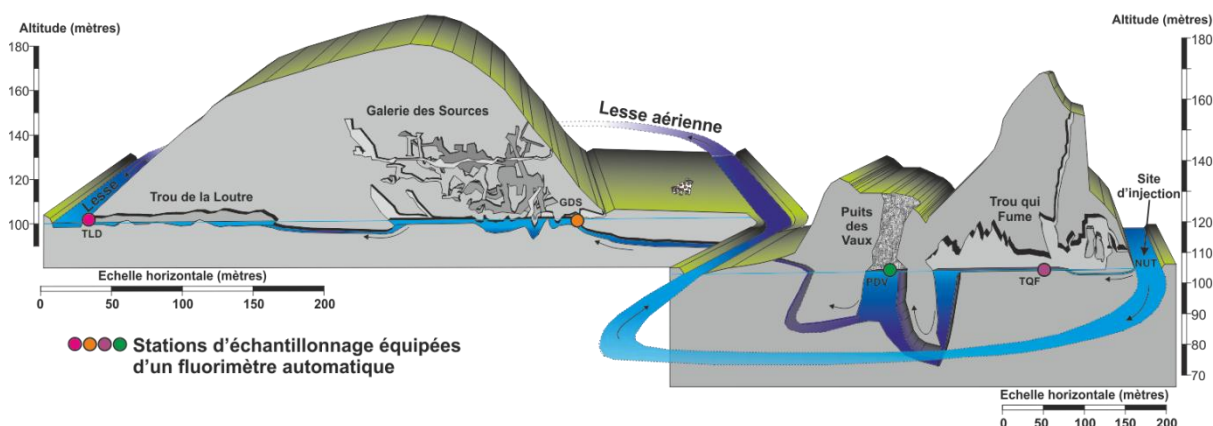


Figure III-1 : Localisation du dispositif d'échantillonnage lors du traçage n° 6.

Les conditions hydrologiques étaient en moyenne de 20 m³/sec à la station de Gendron (Données Service Public de Wallonie), soit un niveau de moyennes eaux. Le débit mesuré à la Galerie des Sources était décroissant durant toute la période du traçage (**Figure III-2**). Il s'échelonne dans une gamme entre 24,0 litres/seconde (à l'injection) et 16,0 litres/seconde (après 200 heures). Un débit constant de 19,0 litres/seconde a été considéré pour ce traçage. Ce débit représente la moyenne durant les 200 premières heures du traçage, période après laquelle une majorité du traceur a quitté le système.

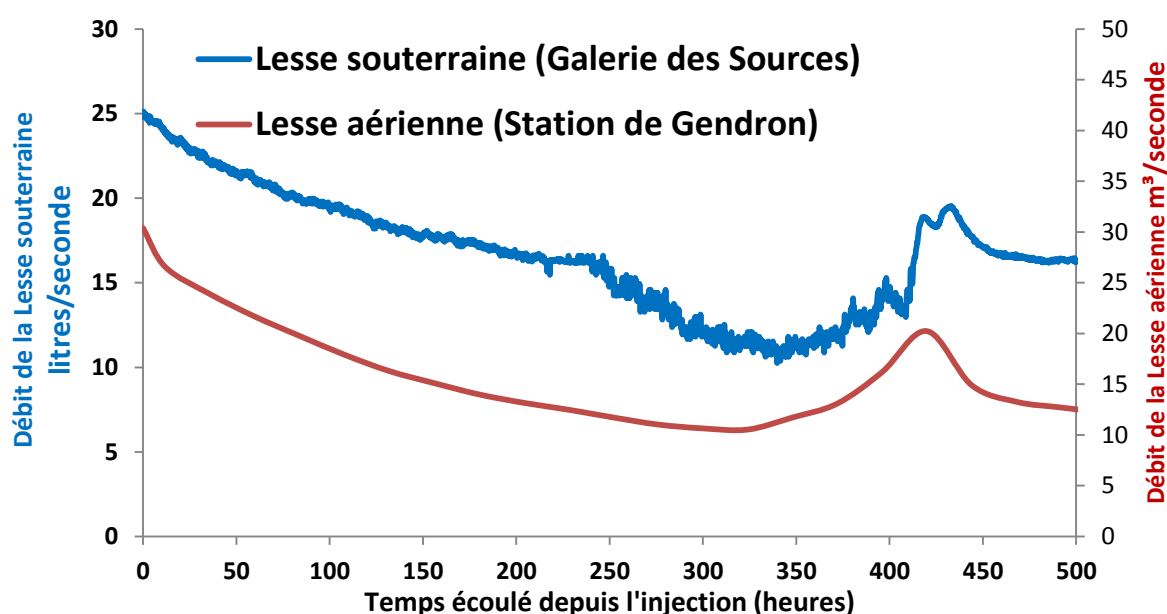


Figure III-2 : Chroniques de débits de la Lesse aérienne et souterraine durant le traçage n° 6 (noter la différence d'unité).

La **Figure III-3** représente les différentes courbes de restitution mesurées aux 4 stations d'échantillonnage. Le **Tableau III-1** synthétise les résultats du traçage n° 6, calculés avec Qtracer2.

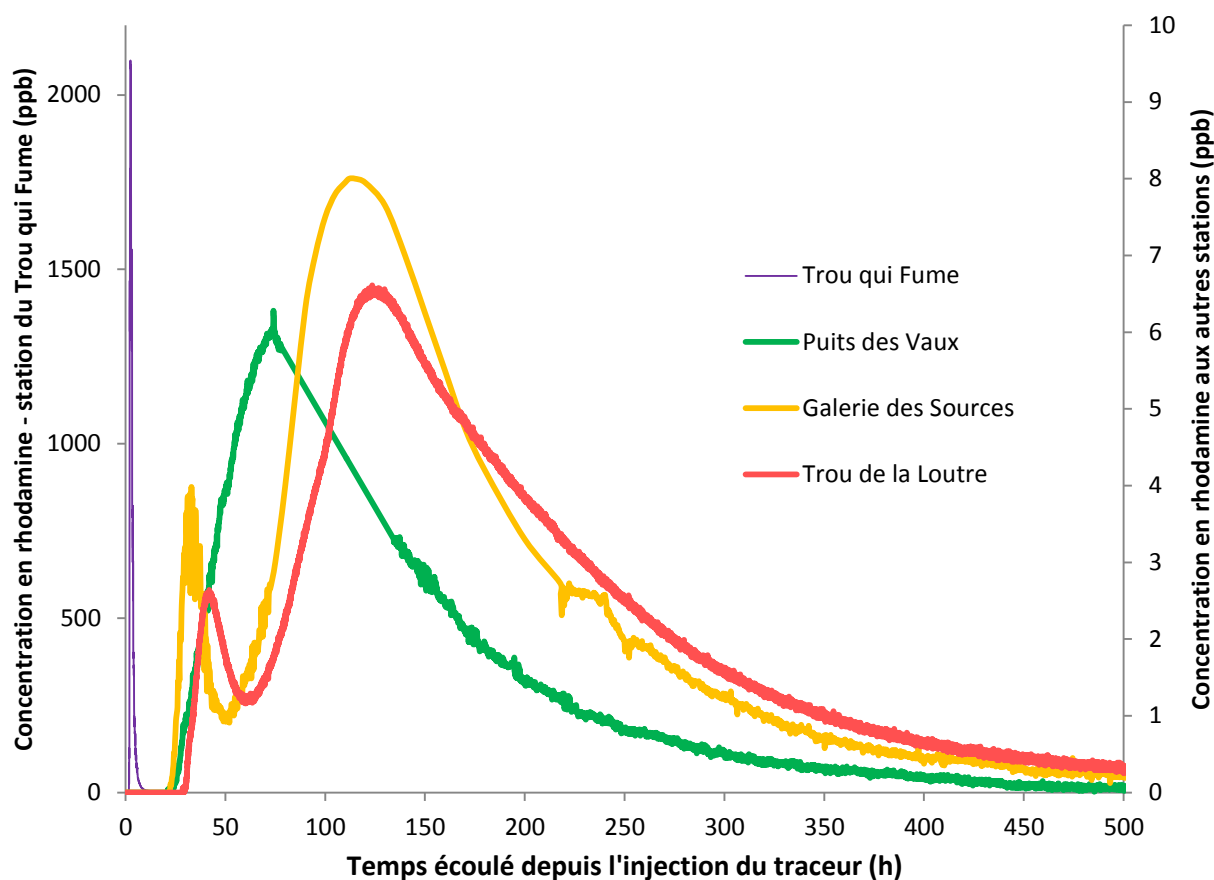


Figure III-3 : Courbes de restitution de la rhodamine aux différentes stations lors du traçage n° 6.

Injection	Traceur (g)	Q (l/sec)	S.E	Dist. (m)	T _{AP} (h)	T _{Mod} (h)	T _{Moy} (h)	V _{max} (m/h)	V _{mod} (m/h)	V _{moy} (m/h)	C _{max} (ppb)	a _L (m)
Nutons	Rhod 200	19,0	TQF	110	1,53	2,43	3,19	71,7	45,2	34,4	2099	1,58
			PDV	310	21,0	74,4	135,6	14,7	4,2	2,3	6,1	59,1
			GDS	770	22,0	112,0	168,0	35,0	6,9	4,6	8,0	110,0
			TDL	1170	28,75	124,15	190,0	40,7	9,4	6,2	6,5	148,5
Injection	Traceur (g)	Q (l/sec)	S.E	D _L (m ² /sec)	TR (%)	AI	V (m ³)	A (m ²)	PN	RN		
Nutons	Rhod 200	19,0	TQF	0,015	100	0	211	1,92	69	13107		
			PDV	0,038	24,4	0,76	8950	28,9	5,2	3376		
			GDS	0,14	39,9	0,60	11492	14,9	7,0	4868		
			TDL	0,254	37,3	0,63	12996	11,1	7,9	5642		

Tableau III-1 : Synthèse des résultats du traçage n° 6 calculés avec Qtracer2 (Field, 2002) – Q : débit moyen mesuré à la Galerie des Sources, S.E : site d'échantillonnage, Dist : distance, T_{AP} : temps d'arrivée première, T_{Mod} : temps modal, T_{Moy} : temps moyen de séjour, V_{max} : vitesse maximale, V_{mod} : vitesse modale, V_{moy} : Vitesse moyenne, C_{max} : concentration maximale, a_L : dispersivité longitudinale, D_L : coefficient de dispersion longitudinale, TR : taux de restitution, AI : accuracy index, V : volume, A : section d'écoulement, PN : nombre de Peclet, RN : nombre de Reynolds.

III.2.2. Commentaire des résultats de l'essai de traçage

Les résultats calculés avec Qtracer2 montrent, d'une part, l'hétérogénéité du système d'écoulement souterrain de la Lesse et, d'autre part, le comportement particulier de la zone noyée du Puits des Vaux. Tous ces résultats ont été commentés dans le chapitre **II.3** de la **Partie 3** de ce travail.

À partir de ces résultats, un modèle conceptuel de double processus de transport au sein de la zone noyée du Puits des Vaux a été développé. C'est ce modèle qui va être utilisé pour tenter de dimensionner et caractériser le système d'écoulement de la Lesse souterraine.

III.3. Présentation du logiciel de modélisation OTIS (Runkel, 1998)

III.3.1. Introduction

Le logiciel OTIS (**O**ne-dimensionnal **T**ransport with **I**nflow and **S**torage) a été utilisé dans le cadre de ce travail suite au succès de l'étude du réseau de la Lesse souterraine de Han-sur-Lesse par M^{me} I. Bonniver, à l'Université de Namur (Bonniver, 2011). Lors de sa thèse, I. Bonniver a démontré l'utilité du modèle OTIS dans le but de réaliser la discrétisation et le dimensionnement d'un système d'écoulement karstique unidimensionnel. Dans le cadre de ce mémoire, il a donc semblé logique de tester la capacité de ce modèle à dimensionner un réseau de dimensions plus étroites, tel que celui de Furfooz.

Otis est un modèle de simulation mathématique utilisé pour caractériser le comportement et le transport de soluté dans les rivières dont l'écoulement est assimilable à un conduit unidimensionnel. Son avantage principal est qu'il permet de discrétiser l'espace et de respecter à la fois les conditions d'écoulement rencontrées au sein des tronçons de rivière et celles rencontrées au sein des zones noyées (Bonniver, 2011). Le logiciel repose sur un modèle basé sur les processus d'emmagasinement temporaires dans les écoulements de surface (Bencala & Walters, 1983). Cela signifie que le transport du soluté est soumis à des processus de transfert de masse entre des zones d'eau mobile et des zones d'eau immobile localisées le long du système (Bonniver, 2011).

L'équation principale gouvernant le modèle est celle de convection-dispersion, à laquelle s'ajoute une série de termes pour tenir compte du phénomène d'emmagasinement temporaire, de dilution, de dégradations et de sorption du soluté pendant son transport. Le logiciel va être utilisé en conjonction avec les données d'essais de traçage pour tenter de quantifier les paramètres de transport et d'écoulement. Cette démarche se réalise par une approche essais-erreurs, durant laquelle la courbe de restitution modélisée est progressivement ajustée à la courbe de restitution mesurée lors de l'essai de traçage.

III.3.2. Principes théoriques du modèle

III.3.2.1. L'emmagasinement temporaire

Le modèle d'emmagasinement temporaire utilisé est celui présenté par Bencala et Walters (1983). Ce modèle réfère l'emmagasinement temporaire comme le piégeage momentané

d'un soluté dans des volumes d'eau peu mobiles comparativement à l'écoulement rapide observé au niveau du centre de la rivière. Ces zones peuvent être des poches d'eau stagnantes ou peu mobiles sur les abords de la rivière, soit des portions poreuses du lit de la rivière entraînant un ralentissement du flux (**Figure III-4** et **Figure III-5**).

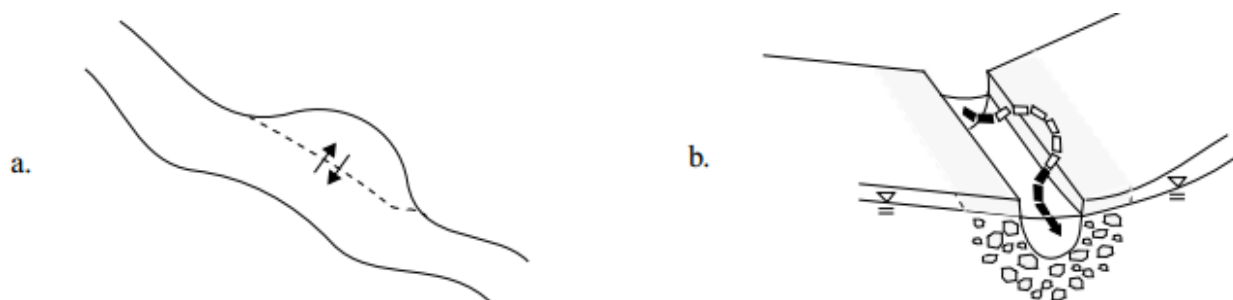


Figure III-4: Processus d'emménagement temporaire – a : volumes d'eau peu mobile, b : piégeage dans le milieu poreux formant le lit et les rives de la rivière. Les flèches montrent les mouvements de soluté entre la zone d'écoulement principal et les zones d'emménagement temporaire (Runkel, 1998).

Le modèle est formé en appliquant l'équation de balance des masses entre deux zones conceptuelles : le canal principal (portion du flux où la convection et la dispersion sont les mécanismes contrôlant le transport) et la zone d'emménagement (portion du flux contribuant au piégeage temporaire du soluté).

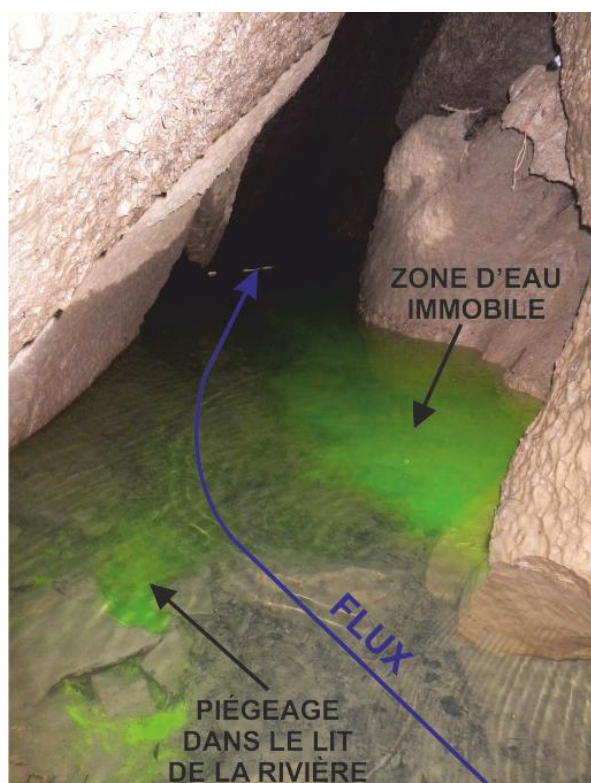


Figure III-5 : Illustration du phénomène d'emménagement temporaire lors d'une injection d'uranine à la Galerie des Sources.

La **Figure III-6** montre les différents processus qui affectent la concentration du soluté dans le conduit principal et dans la zone d'emménagement :

- au sein du conduit principal, le soluté est transporté vers l'aval par la convection et la dispersion ;
- la convection et la dispersion ne sont pas prises en compte dans la zone d'emménagement, le transport vers l'aval étant considéré comme négligeable ;
- les flux latéraux entrants représentent des débits s'additionnant au système, tels que le ruissellement, des conduits latéraux ou encore le drainage de la nappe d'eau souterraine. Ces flux sont responsables d'un processus de dilution du soluté ;
- les flux latéraux sortants représentent des volumes quittant le conduit principal tels que les diffusions, les pertes ou infiltrations ;
- le conduit principal et la zone d'emménagement sont liés par des processus de stockage temporaire de soluté. L'échange de masse entre les deux, attribuable au

stockage temporaire, est modélisé comme un processus de transfert de masse de premier ordre ;

- les réactions chimiques se produisent dans le canal principal ainsi que dans la zone d'emménagement.

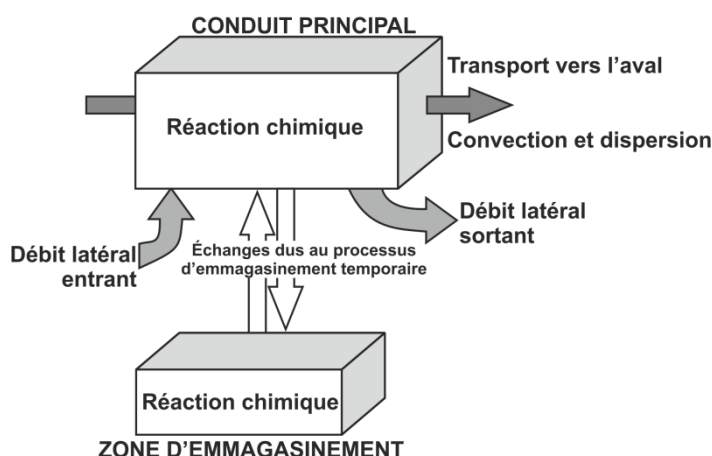


Figure III-6: Modèle conceptuel OTIS montrant les processus affectant le conduit principal et la zone d'emménagement (Runkel, 1998 – modifié).

III.3.3. Postulats de base du modèle

Le postulat principal utilisé dans la résolution de l'équation du modèle est que la concentration en soluté varie uniquement dans la direction longitudinale (ce faisant, la concentration ne varie pas latéralement ou en profondeur). Partant de ce postulat, les équations sont développées pour un système unidimensionnel qui consiste en une série de segments. Chaque segment inclut le canal principal et la zone de stockage temporaire, deux aires conceptuelles entre lesquelles la masse est conservée.

III.3.3.1. Postulats pour le conduit principal

- Les processus physiques affectant les concentrations en soluté sont la convection, la dispersion, les débits latéraux et l'emménagement temporaire.
- Les réactions chimiques affectant les concentrations en soluté sont la sorption sur le lit de la rivière et la dégradation du soluté.
- Tous les paramètres du modèle décrivant les processus physiques et les réactions chimiques peuvent varier spatialement.
- Les paramètres décrivant la convection et les débits latéraux peuvent être temporellement variables. Ces paramètres incluent le débit, la section transversale du conduit principal, les débits latéraux et la concentration en soluté associée aux débits latéraux. Tous les autres paramètres restent constants dans le temps.

III.3.3.2. Postulat pour la zone d'emménagement

- L'emménagement temporaire est le seul processus physique affectant la concentration en soluté dans la zone de stockage. La convection, la dispersion et les flux latéraux n'ont pas d'influence à ce niveau.

- Les réactions chimiques affectant les concentrations en soluté sont la sorption et la dégradation du soluté.
- Tous les paramètres décrivant l'emménagement temporaire et les réactions chimiques peuvent varier dans l'espace, mais restent constants dans le temps.

III.3.4. Équations du modèle

En considérant les processus physiques décrits dans la section précédente, Runkel & Broshears (1991) écrivent un couple d'équations différentielles décrivant le système :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{Q}{A} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(AD \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q_{LIN}}{A} (C_L - C) + \alpha (C_S - C) \quad (1)$$

$$\frac{dC_S}{dt} = \alpha \frac{A}{A_S} (C - C_S) \quad (2)$$

Où :

- A - Section transversale du conduit principal [L²] ;
- A_S - Section transversale de la zone d'emménagement [L²] ;
- C - Concentration en soluté du conduit principal [M/L³] ;
- C_L - Concentration en soluté des débits latéraux entrants [M/L³] ;
- C_S - Concentration en soluté dans la zone d'emménagement [M/L³] ;
- D - Coefficient de dispersion [L²/T] ;
- Q - Débit [L³/T] ;
- q_{LIN} - Taux de débit latéral [L²/T] ;
- t - Temps [T] ;
- x - Distance [L] ;
- α - Coefficient d'échange avec la zone d'emménagement [1/T].

Ces équations décrivent les processus physiques affectant la concentration en soluté dans le système aquatique, elles ne sont applicables que dans le cas de traceurs conservatifs.

Dans le cas de solutés non conservatifs, affectés par les processus chimiques de sorption cinétique et de dégradation de premier ordre, des termes sont ajoutés aux équations principales (Bencala, 1983). Ces termes sont décrits dans les équations (3) et (4).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = L(C) + \rho \hat{\lambda} (C_{sed} - K_d C) - \lambda C \quad (3)$$

$$\frac{dC_S}{dt} = S(C_S) + \hat{\lambda}_S (\hat{C}_S - C_S) - \lambda_S C_S \quad (4)$$

Où :

- L(C) - Processus physiques – Membre de droite de l'équation (1) ;
- S(C_S) - Processus physiques – Membre de droite de l'équation (2) ;
- \hat{C}_S - Concentration en soluté dans le sédiment de la zone d'emménagement [M/L³] ;
- C_{sed} - Concentration de soluté en sorption sur le lit du conduit principal [M/M] ;
- K_d - Coefficient de distribution [L³/M] ;
- λ - Coefficient de dégradation du premier ordre au sein du conduit principal [1/T] ;
- λ_S - Coefficient de dégradation du premier ordre dans la zone d'emménagement [1/T] ;
- $\hat{\lambda}$ - Coefficient de taux de sorption dans le conduit principal [1/T] ;

- $\hat{\lambda}_s$ - Coefficient de taux de sorption dans la zone d'emménagement [1/T] ;
 ρ - Masse de sédiments disponible à la sorption par volume d'eau [M/L³].

L'équation (3) introduit C_{sed} , une troisième variable de concentration pour laquelle l'équation de la balance des masses est également appliquée. L'évolution en fonction du temps de la concentration de soluté en sorption sur le lit du conduit principal est décrite par l'équation (5).

$$\frac{dC_{sed}}{dt} = \hat{\lambda}(K_d C - C_{sed}) \quad (5)$$

Notons que, dans le cas présent, les traceurs utilisés étant tous conservatifs, les effets chimiques ne seront pas pris en compte.

III.3.5. Solution numérique

III.3.5.1. Le système conceptuel

Pour résoudre les équations (3) à (5), qui varient dans le temps et l'espace, des techniques de résolutions numériques doivent être employées. Pour implémenter un schéma de solution numérique, le système physique est décrit dans un premier temps comme un système idéalisé dans lequel la zone d'écoulement est subdivisée en une série de segments discrets (**Figure III-7**). Chacun de ces segments représente un certain volume dans lequel la masse est conservée et sur lequel les équations (3) à (5) vont être appliquées.

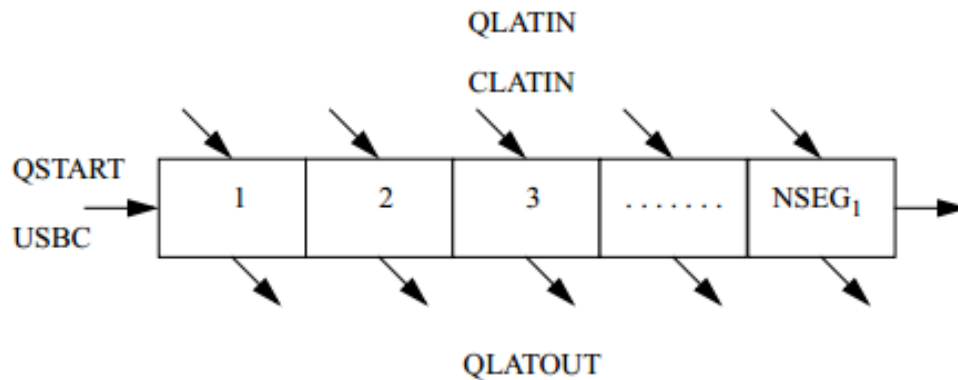


Figure III-7: Subdivision du système conceptuel en N segments et inputs du modèle – QSTART : débit à l'amont du système, USBC : conditions d'introduction du soluté dans le modèle, QLATIN : débit latéral entrant, CLATIN : Concentration du soluté entrant, QLATOUT : débit latéral sortant (Runkel, 1998).

La **Figure III-8**, ci-dessous, représente trois segments arbitraires du système conceptuel de la **Figure III-7**. Dans ce schéma de segmentation, les concentrations et paramètres au centre de chaque segment sont notés i , $i+1$ et $i-1$, alors que les paramètres aux interfaces entre segments sont notés $(i-1, i)$ et $(i, i+1)$. La longueur de chaque segment, Δx , est également représentée sur la figure.

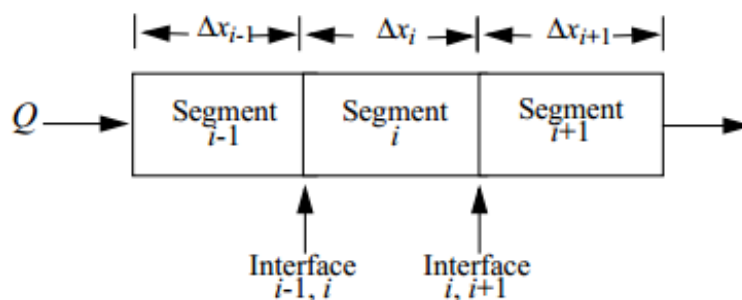


Figure III-8 : Schéma de segmentation et dénomination des différents segments et interfaces (Runkel, 1998).

Afin de simplifier le système conceptuel, les segments peuvent être regroupés en *reaches*. Un reach est défini comme une distance continue le long de laquelle les paramètres du modèle restent constants (**Figure III-9**). Dans le cas présent, un reach pourra, par exemple, représenter un tronçon défini et connu de rivière souterraine ou, au contraire, une zone noyée, de dimensions et de caractéristiques inconnues. Le nombre de reaches défini pour un système donné reflète autant la variabilité intrinsèque du milieu physique modélisé que la disponibilité des données pour les différents tronçons du système karstique.

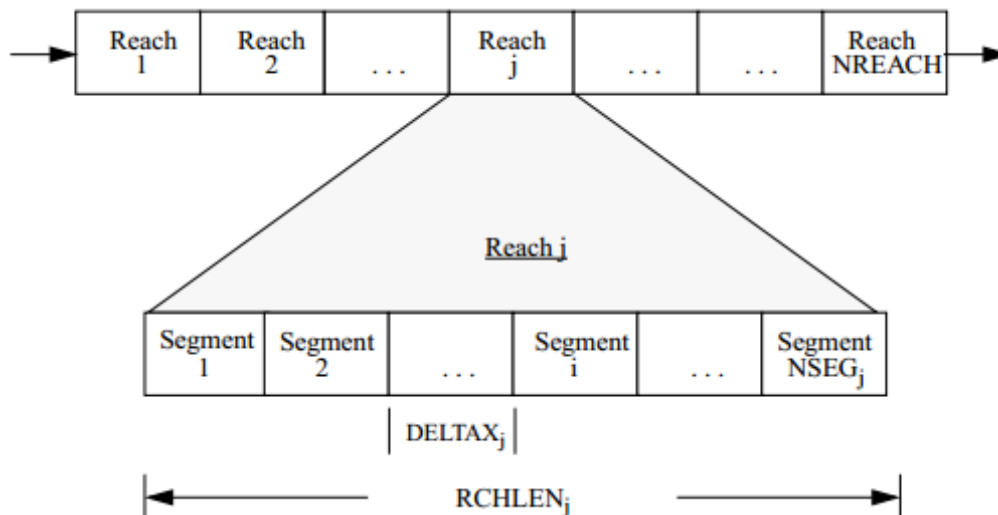


Figure III-9 : Schéma de regroupement de segments en reaches. Δx_j : longueur des segments du reach j , $RCHLEN_j$: longueur du reach j (Runkel, 1998).

III.3.5.2. Méthode de Crank-Nicolson

De par la présence des dérivées temporelles et spatiales, l'équation (3) est une équation différentielle partielle. La méthode commune de résolution de ce type d'équation est l'approximation de la dérivée spatiale, $\partial/\partial x$, en utilisant les différences finies. Ensuite, les méthodes standard type Crank-Nicolson peuvent être implémentées. Dans le cas de OTIS, la méthode implicite de Crank-Nicolson est utilisée car elle est efficace, précise et inconditionnellement stable (Chapra & Canale, 1988).

III.3.5.2.1. Concentration en soluté dans le conduit principal

En approximant la dérivée spatiale de l'équation (3) par la méthode des différences finies, celle-ci devient :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = L[C] + \frac{q_{LIN}}{A_i}(C_L - C_i) + \alpha(C_S - C_i) + \rho\hat{\lambda}(C_{sed} - K_d C_i) - \lambda C_i \quad (6)$$

où $L[C]$ est l'approximation par différences finies des termes de convection et dispersion donnée par :

$$L[C] = -\left(\frac{Q}{A}\right)_i \left(\frac{C_{i+1} - C_{i-1}}{2\Delta x}\right) + \frac{1}{A_i} \left\{ \frac{(AD)_{i,i+1}(C_{i+1} - C_i) - (AD)_{i-1,i}(C_i - C_{i-1})}{\Delta x^2} \right\} \quad (7)$$

Dans l'algorithme de Crank-Nicolson, la partie droite de l'équation (6) est évaluée à la fois au temps présent (temps j) et au temps futur (temps $j+1$). La dérivée par rapport au temps, $\frac{\partial C}{\partial t}$, est estimée en utilisant une approximation par la méthode des différences centrées :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} \quad (8)$$

où

Δt - le pas de temps d'intégration [T] ;

j - indique la valeur du paramètre ou de la variable au temps présent ;

$j+1$ - indique la valeur du paramètre ou de la variable au temps futur.

L'équation (6) devient :

$$\frac{C_i^{j+1} - C_i^j}{\Delta t} = \frac{G[C, C_S, C_{sed}]^{j+1} + G[C, C_S, C_{sed}]^j}{2} \quad (9)$$

dans laquelle

$$G[C, C_S, C_{sed}] = L[C] + \frac{q_{LIN}}{A_i}(C_L - C_i) + \alpha(C_S - C_i) + \rho\hat{\lambda}(C_{sed} - K_d C_i) - \lambda C_i \quad (10)$$

III.3.5.2.2. Concentration en soluté dans la zone d'emménagement temporaire

Les concepts présentés dans les sections précédentes peuvent être appliquées à l'équation (4) qui concerne le soluté situé dans la zone d'emménagement temporaire. Cela résulte en l'expression suivante :

$$\frac{C_S^{j+1} - C_S^j}{\Delta t} = \frac{\left(\alpha \frac{A}{A_S}(C - C_S) + \hat{\lambda}_S(\hat{C}_S - C_S) - \lambda_S C_S\right)^{j+1} + \left(\alpha \frac{A}{A_S}(C - C_S) + \hat{\lambda}_S(\hat{C}_S - C_S) - \lambda_S C_S\right)^j}{2} \quad (11)$$

III.3.5.3. Conditions limites du modèle

Deux conditions limites doivent être spécifiées pour résoudre des équations différentielles de second ordre, telle que l'équation (3). Pour le cas d'un écoulement dans un conduit de type unidimensionnel, ces conditions limites doivent être appliquées aux limites amont et aval du système modélisé.

III.3.5.3.1. Condition à la limite amont

La condition limite amont est définie comme une concentration en soluté fixée (C_{bc}), entrant dans le système modélisé (**Figure III-10**). Il est possible de faire varier cette condition limite dans le temps.

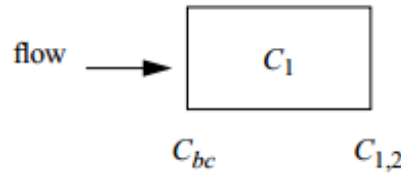


Figure III-10 : Condition limite amont définie en tant que concentration fixée C_{bc} (Runkel, 1998).

Le logiciel permet de spécifier trois types d'introduction de soluté dans le modèle en tant que condition limite amont (**Figure III-11**) :

- Une condition type « Concentration – step (C.S) ». Dans ce cas, la valeur de concentration imposée à la limite amont est mise à jour selon les données (temps, concentration [C_{bc}]) de l'utilisateur. De cette manière, il est possible de modéliser une injection quasi-instantanée de soluté, telle que c'est le cas lors d'un traçage.
- Une condition de type « Flux – step ». Dans ce cas, ce sont des valeurs de flux à la limite amont (QC_{bc}) qui sont précisées pour chaque pas de temps par l'utilisateur.
- Une condition de type « Concentration – continuous ». Dans ce dernier cas, une courbe de concentration continue est imposée à la limite amont.

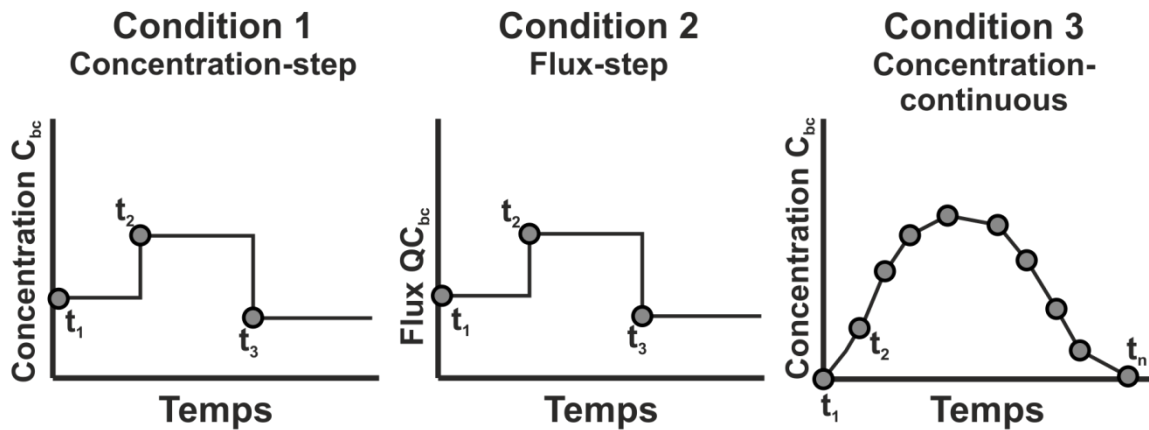


Figure III-11 : Différents types de conditions limite amont - C_{bc} : Concentration à l'entrée du modèle au temps i , t_i : temps de mise à jour de la concentration à l'entrée du système, imposé par l'utilisateur (Runkel, 1998 – modifié).

III.3.5.3.1. Condition à la limite aval

Contrairement à l'amont, la condition aval ne consiste pas en une concentration fixée, mais bien en un flux dispersif. Pour mettre cela en œuvre, un flux dispersif est défini à l'interface entre le dernier segment du modèle (i) et un segment fictif adjacent au dernier segment (**Figure III-12**).

$$DSBOUND = \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{i,i+1} \quad (12) \quad \text{flow} \rightarrow \begin{array}{|c|c|} \hline C_{i-1} & C_i \\ \hline \end{array} \quad C_{i+1}$$

\uparrow
 $\left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Big|_{i,i+1}$

Figure III-12 : Condition limite aval du modèle OTIS (Runkel, 1998).

Ce flux DSBOUND est fixé à zéro, sous-entendant que la concentration dans le segment i est égale à celle dans le segment $i+1$.

III.4. Modèle conceptuel de la Lesse souterraine de Furfooz

III.4.1. Fonctionnement du système

Les observations de terrain et les essais de traçage ont permis d'élaborer un modèle conceptuel composé de 4 sous-systèmes (**Figure III-13**) :

- le sous-système de type rivière souterraine « Chantoir des Nutons – Lac du Trou qui Fume » (**NUT-TQF**) mesurant 210 mètres ;
- le sous-système de type zone noyée « lac du Trou qui Fume – Puits des Vaux » (**TQF-PDV**) mesurant 150 mètres ;
- le sous-système de type inconnu « Puits des Vaux – Galerie des Sources » (**PDV-GDS**) mesurant 410 mètres ;
- le sous-système de type rivière souterraine « Galerie des Sources – Trou de la Loutre » (**GDS-TDL**) mesurant 400 mètres.

Le modèle de fonctionnement du système, sur base des observations, est le suivant.

Après la traversée du sous-système NUT-TQF, le flux pénètre dans la zone noyée du sous-système TQF-PDV, où il semble se diviser en deux (**Figure III-14**):

- une partie est transportée rapidement vers le sous-système PDV-GDS par un processus convectif dans un drain principal ;
- une autre partie, la majorité, est ralentie par un effet de diffusion vers le large volume d'eau immobile que représente le sous-système TQF-PDV. Le nuage de traceur s'homogénéise dans ce système capacitif annexe, où la vitesse est plus lente et la diffusion est très forte. Son évacuation progressive vers le sous-système PDV-GDS vient constituer un second pic de restitution aux stations « Galerie des Sources » et « Trou de la Loutre ».

Les sous-systèmes PDV-GDS et GDS-TD semblent, quant à eux, constituer des tronçons de rivière souterraine « classiques », où la convection est le processus de transport dominant.

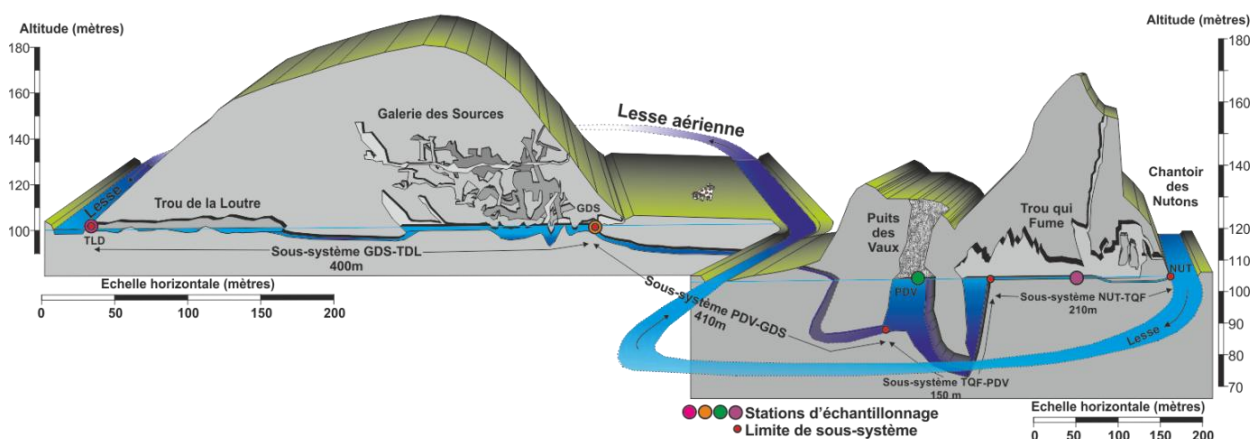


Figure III-13 : Modèle conceptuel du cours souterrain de la Lesse divisé en 4 sous-systèmes distincts. Noter la position des stations d'échantillonnage par rapport aux limites entre les différents sous-systèmes.

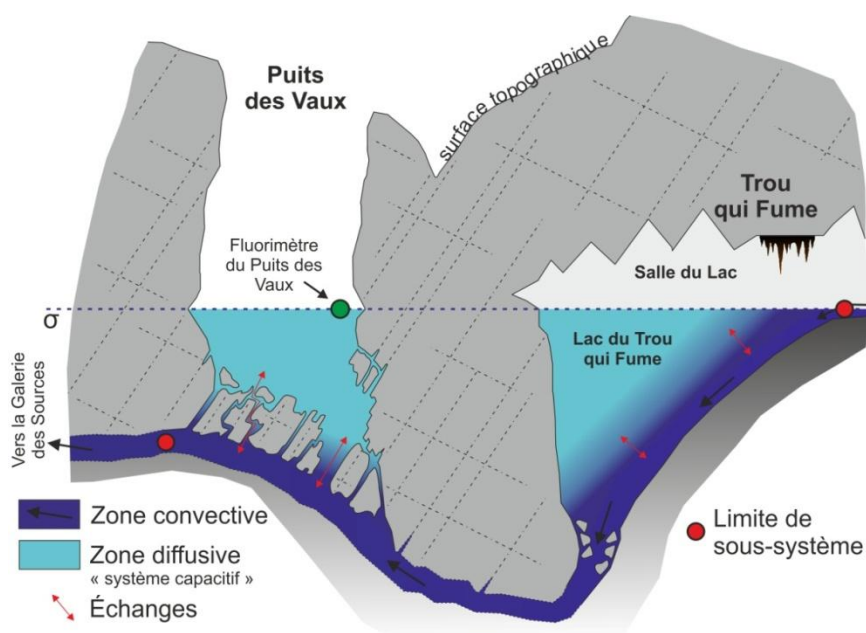


Figure III-14 : Schéma conceptuel du double processus d'écoulement affectant le sous-système de type noyé « Trou qui Fume – Puits des Vaux » (schéma sans échelle).

Dans le but de dimensionner ces 4 sous-systèmes, il était nécessaire de considérer les deux processus de transport (convectif et diffusif) dans la modélisation. OTIS ne permettant pas de réaliser des modèles d'une telle complexité, il a été nécessaire de séparer les deux processus en deux modèles distincts, et de les additionner par la suite. Ceci étant, on ne considérera pas d'échange de masse entre le nuage transporté rapidement par convection et celui considérablement ralenti dans la zone noyée. Cela constitue une approximation importante, mais il s'agit d'une limitation imposée par OTIS.

Enfin, le modèle conceptuel considère la station d'échantillonnage du Puits des Vaux comme étant située dans la zone diffusive, en annexe de l'écoulement principal. Or, il se fait que le modèle OTIS ne permet pas d'évaluer l'évolution de la concentration en traceur hors du conduit principal d'écoulement. La courbe de restitution du Puits des Vaux ne sera donc pas prise en compte dans notre modèle.

III.4.2. Découplage des courbes de restitution

Pour modéliser les deux processus de transport, les courbes de restitution présentant un double pic ont été utilisées. Ces courbes ont été « découplées », c'est-à-dire que les deux pics de la courbe ont été divisés en deux courbes distinctes. La première courbe représente le transport « rapide » convectif, la seconde courbe le transport « ralenti » diffusif. Pour chacune de ces courbes, les taux de restitution ont été calculés. Ils valent respectivement :

- **1,96 %** pour la courbe « convective » et **38,02 %** pour la courbe « diffusive » de la Galerie des Sources, soit un total de **40,0 %** (Figure III-15);

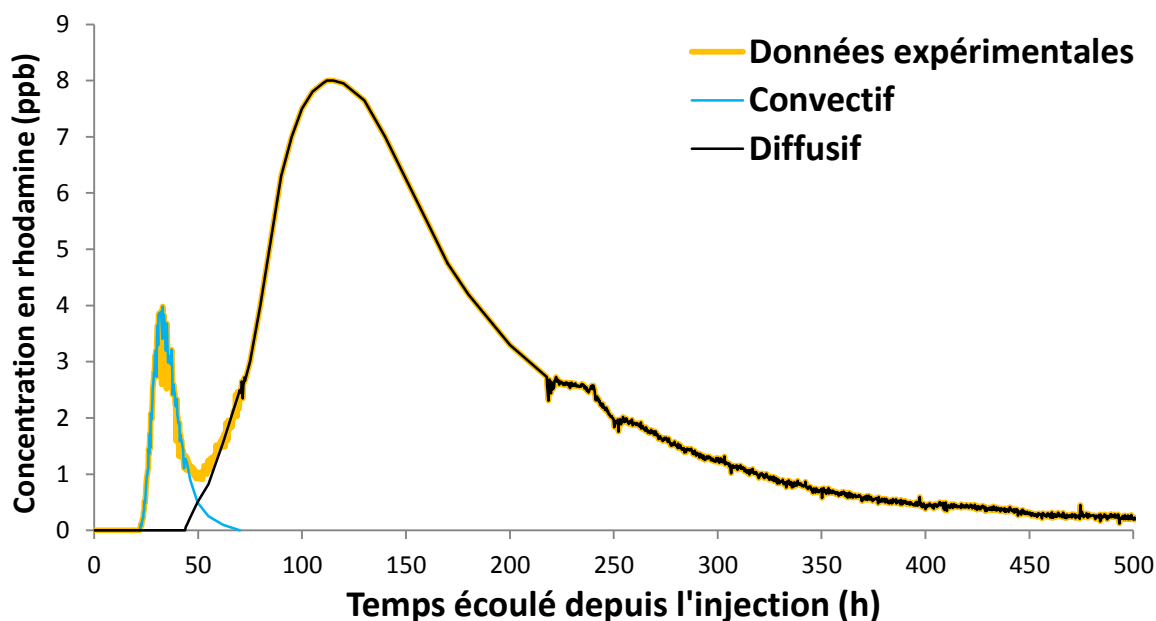


Figure III-15 : Courbe de restitution du traçage n° 6 à la Galerie des Sources et séparation de la courbe selon les deux pics de restitution correspondant aux deux modes de transport.

- **1,89 %** pour la courbe « convective » et **35,43 %** pour la courbe « dispersive » du Trou de la Loutre, soit un total de **37,32 %** (Figure III-16) ;

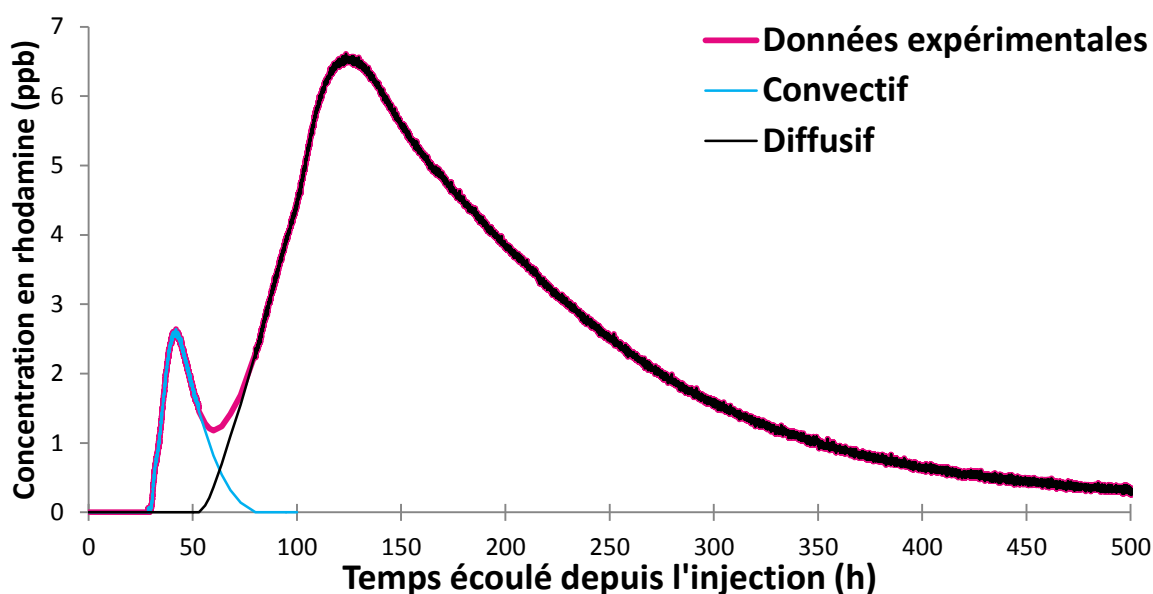


Figure III-16 : Courbe de restitution du traçage n° 6 au Trou de la Loutre et séparation de la courbe selon les deux pics de restitution correspondant aux deux modes de transport.

III.5. Modélisation des traçages avec le logiciel OTIS

II.5.1. Méthodologie de modélisation

La modélisation s'est déroulée en plusieurs étapes. Dans un premier temps, le modèle convectif a été calibré pour l'ensemble du système. À partir des données de ce modèle, le modèle diffusif a été calibré à son tour. Ensuite, l'addition des deux modèles a permis de construire un modèle global correspondant au modèle conceptuel. Finalement, la calibration

des paramètres du dernier sous-système (GDS-TDL) a été validée à partir des résultats d'autres traçages.

En ce qui concerne la calibration des paramètres d'écoulement et de transport, elle a été réalisée par ajustement progressif de la courbe modélisée sur les données expérimentales de l'essai de traçage. Cet ajustement a été obtenu systématiquement en trois étapes consécutives (Bonniver, 2011) :

- *étape 1* : ajustement du temps d'arrivée première, principalement conditionné par la section d'écoulement principal (**A**) ;
- *étape 2* : ajustement de la branche ascendante de la courbe, principalement conditionnée par le processus de dispersion ;
- *étape 3* : ajustement de la phase de tarissement de la courbe de restitution, principalement conditionnée par la section de la zone d'emménagement (**A_s**) et la valeur du coefficient d'échange (**α**).

Après plusieurs ajustements par essai-erreur, la courbe modélisée correspondant le mieux aux données expérimentales est conservée. Celle-ci est caractérisée par 4 données de calibrations principales : la section d'écoulement principal (**A**), la section de la zone d'emménagement (**A_s**), le coefficient de dispersion longitudinal (**D_L**) et le coefficient d'échange avec la zone d'emménagement temporaire (**α**).

Deux grandeurs supplémentaires sont calculées pour chaque modèle en vue d'en évaluer la stabilité. Il s'agit des nombres adimensionnels de Courant numérique (**C_r**) et de Peclet numérique (**P_e**) (Bonniver, 2011).

$$C_r = \frac{v \cdot \Delta t}{\Delta l} \quad (13)$$

$$P_e = \frac{v \cdot \Delta l}{D} \quad (14)$$

Où :

v - vitesse de la particule [L/T] ; **Δt** - pas de temps d'intégration [T] ;
Δl - largeur de l'élément discrétisé [L] ; **D** - dispersion longitudinale [L²/T].

Le nombre de Courant numérique permet de comparer la discrétisation temporelle et spatiale en tenant compte de la vitesse de convection. Si **C_r** est inférieur à 1, la distance de transport par convection est inférieure à la longueur de l'élément considéré et la variation de concentration qui en résulte peut être visualisée dans cet élément. Un nombre de Courant numérique supérieur à 1 conduit à des instabilités importantes du modèle.

Le nombre de Peclet numérique compare les effets convectif et dispersif au niveau d'un élément de la structure discrétisée. Un nombre de Peclet numérique supérieur à 2 induit des oscillations numériques importantes. En milieu peu dispersif, la restriction sur le nombre de Peclet numérique entraîne la nécessité d'utiliser des mailles de petite dimension lors de la modélisation.

III.5.2. Étape 1 : Modélisation du processus de transport convectif

III.5.2.1. Construction du modèle convectif

Le modèle convectif est constitué des 4 sous-systèmes représentés par 3 « reaches » (**Figure III-17**):

- le sous-système « Chantoir des Nutons – lac du Trou qui Fume » est formé de 1 reach de 210 mètres de longueur, divisé en 420 segments de 0,5 mètre ;
- les sous-systèmes « lac du Trou qui Fume – Puits des Vaux » et « Puits des Vaux – Galerie des Sources » sont regroupés en 1 reach de 560 mètres de longueur, divisé en 1 120 segments de 0,5 mètre ;
- le sous-système « Galerie des Sources – Trou de la Loutre » est formé de 1 reach de 400 mètres de longueur, divisé en 800 segments de 0,5 mètre.

Le tronçon « lac du Trou qui Fume – Galerie des Sources » est représenté ici par un seul reach et pas deux, comme c'est le cas d'après le modèle conceptuel général. En effet, sur le plan convectif, aucune information ne permet de faire une distinction entre les sous-systèmes 2 et 3 du modèle conceptuel général. Ils ont donc été regroupés en un seul reach. Par contre, au niveau du modèle diffusif, une distinction sera faite entre les deux sous-systèmes qui seront chacun représentés par un reach.

Une condition amont de type « Concentration – step » est imposée à l'entrée du reach 1 et correspond à une injection ponctuelle de 200 g de rhodamine dans le système.

L'ensemble des caractéristiques du modèle convectif est repris dans le **Tableau III-2**.

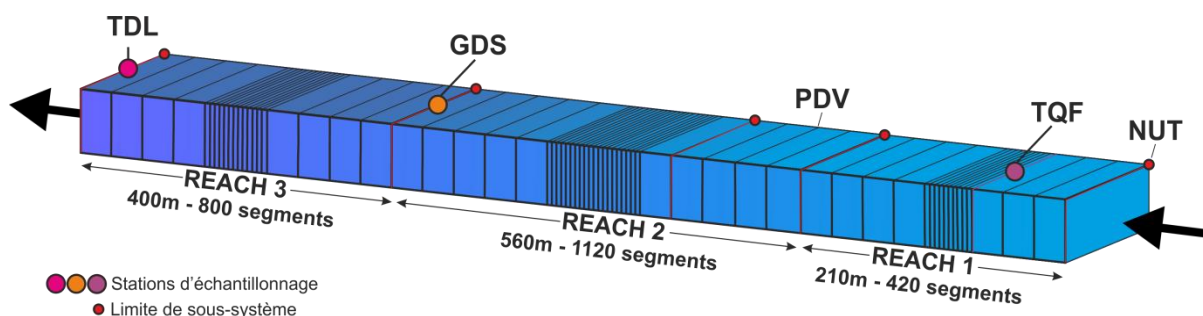


Figure III-17 : Schéma de discrétisation du modèle d'écoulement convectif.

Sous-systèmes	N° du reach	Longueur (m)	Nsegm	Δt (h)	USBC	Q (l/sec)	a_L (m)	D_L (m ² /sec)	A (m ²)	As (m ²)	α (sec ⁻¹)
NUT-TQF	1	210	420	0,0008	C.S	19,0	à calibrer				
TQF-PDV PDV-GDS	2	560	1120				à calibrer				
GDS-TDL	3	400	800				à calibrer				

Tableau III-2 : Caractéristiques relatives à la discrétisation du modèle d'écoulement convectif 3 reaches – Nsegm : nombre de segments, Δt : pas de temps d'intégration, USBC : condition limite amont, Q : débit moyen, a_L : dispersivité longitudinale, D_L : coefficient de dispersion longitudinale, A : section de la zone d'écoulement principale, As : section de la zone d'emménagement, α : coefficient d'échange avec la zone d'emménagement.

III.5.2.2. Calibration du modèle convectif

Le modèle de transport convectif a été réalisé en calibrant pas à pas les 3 reaches qui le composent à l'aide des courbes de restitution mesurées aux stations d'échantillonnage. Pour les stations présentant une double courbe de restitution, c'est la courbe « convective » qui a été utilisée.

III.5.2.2.1. Reach 1 : Sous-système « Chantoir des Nutons – Trou qui Fume »

Ce premier sous-système a été modélisé en utilisant la courbe mesurée à la station d'échantillonnage du Trou qui Fume (**Figure III-13**). À partir des observations de terrain, l'écoulement dans la galerie où était situé le fluorimètre a été considéré comme ayant un comportement et une géométrie constante (*cf. Topographie du Trou qui Fume*). Pour cette raison, les paramètres d'écoulement ont été calibrés pour une distance de 110 mètres (distance jusqu'au fluorimètre) et sont considérés comme constants pour une distance de 210 mètres (c'est-à-dire jusqu'au début du lac, soit l'ensemble du reach 1). La **Figure III-18** représente la courbe de restitution modélisée pour le reach 1 ainsi que les valeurs des données expérimentales mesurées à la station du Trou qui Fume. Le **Tableau III-3** reprend les valeurs des paramètres calibrés avec OTIS pour le reach 1.

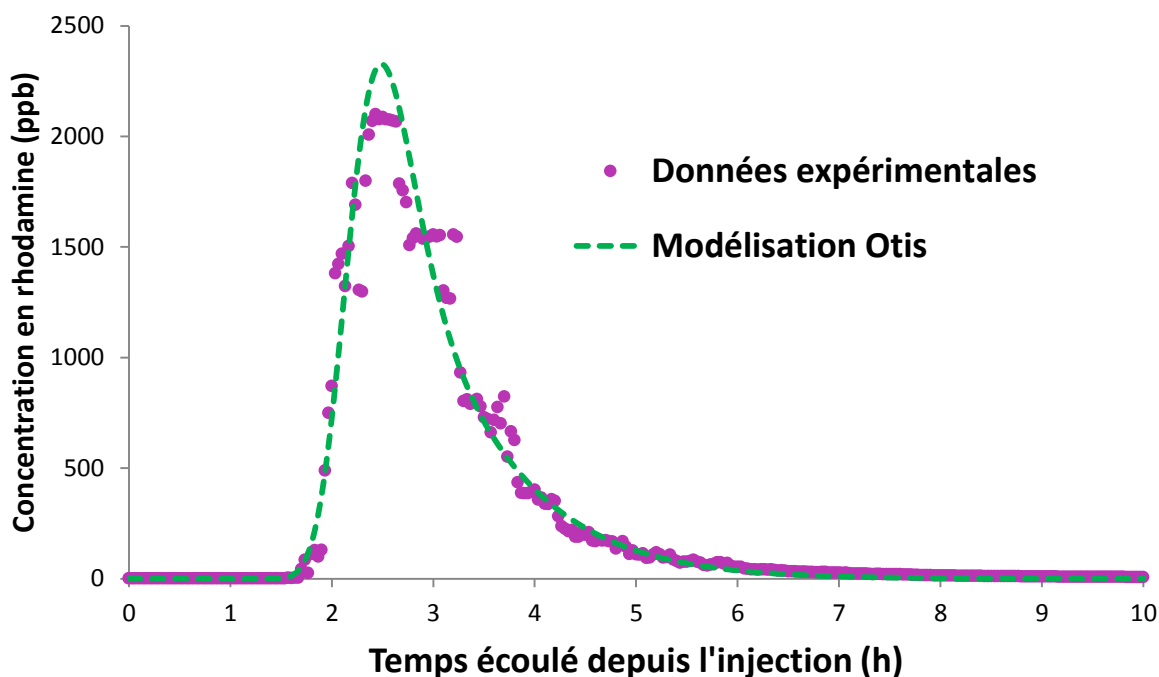


Figure III-18 : Courbe de restitution modélisée et données expérimentales pour le reach 1 (NUT-TQF).

Reach	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol_s	Vol_{Tot}	α	Cr	Pe
	l/sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
1 NUT-TQF	19,0	1,45	305	0,0126	1	0,0126	0,3	63	368	1,0E-04	0,0073	0,5

Tableau III-3 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs au reach 1 du modèle d'écoulement convectif.

III.5.2.2.2. Reach 2 : Sous-systèmes « Trou qui Fume – Puits des Vaux » et « Puits des Vaux – Galerie des Sources »

Le second modèle a permis de calibrer le reach « TQF-GDS » à partir de la première courbe mesurée à la Galerie des Sources ainsi que les paramètres du reach 1, calibrés préalablement. La **Figure III-19** représente la courbe de restitution modélisée pour les reaches 1 et 2 ainsi que les données expérimentales mesurées à la Galerie des Sources. Le **Tableau III-4** reprend les valeurs des paramètres calibrés avec OTIS pour le reach 2.

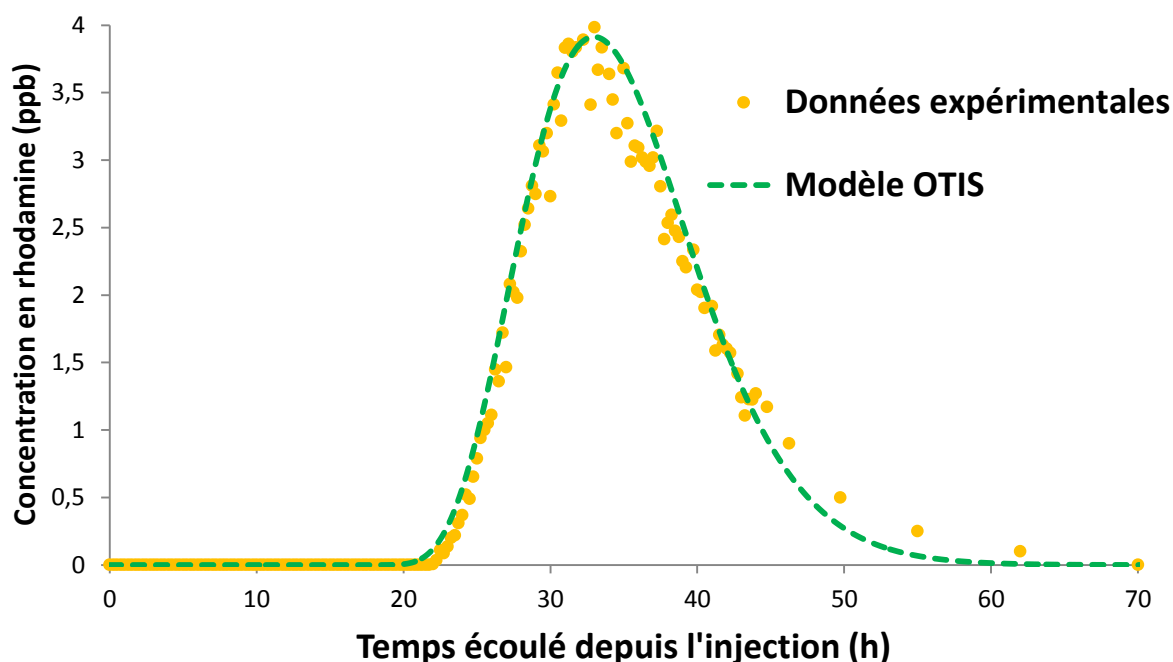


Figure III-19 : Courbe de restitution modélisée et données expérimentales pour les reaches 1 et 2 (NUT-GDS).

Reach	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol_s	Vol_{tot}	α	Cr	Pe
	l/sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
2 TQF-GDS	19,0	2,1	1176	0,009	1	0,00905	1,5	840	2016	1,5E-04	0,052	0,5

Tableau III-4 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs au reach 2 du modèle d'écoulement convectif.

III.5.2.2.3. Reach 3 : Sous-système « Galerie des Sources – Trou de la Loutre »

Le dernier reach du système convectif a été calibré en utilisant la première courbe de restitution mesurée au Trou de la Loutre ainsi que les paramètres des reaches 1 et 2, calibrés préalablement. L'addition de ce dernier reach permet de finaliser le modèle convectif. La **Figure III-20** représente la courbe de restitution modélisée pour les reaches 1, 2 et 3 ainsi que les données expérimentales mesurées au Trou de la Loutre. Le **Tableau III-5** reprend les valeurs des paramètres calibrés avec OTIS pour le reach 3.

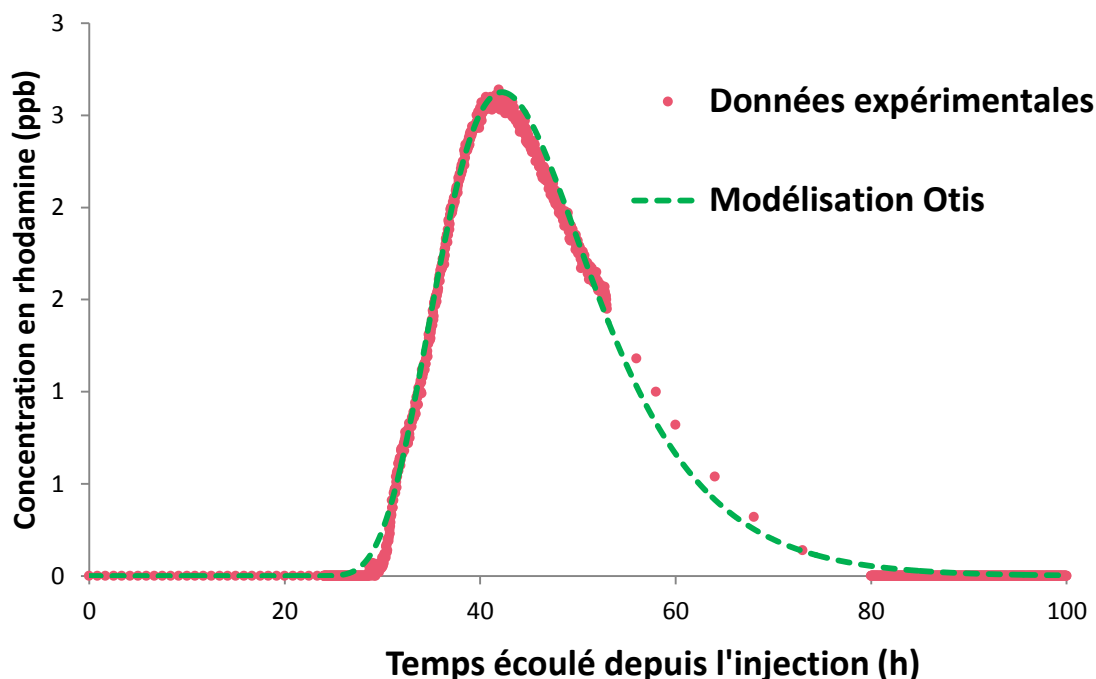


Figure III-20 : Courbe de restitution modélisée et données expérimentales pour l'ensemble du modèle convectif 3 reaches (NUT-TDL).

Reach	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol_s	Vol_{Tot}	α	Cr	Pe
	l/sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
3 GDS-TDL	19,0	1,1	440	0,0173	10	0,1727	0,9	360	800	4,5E-05	0,099	0,05

Tableau III-5 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs au reach 3 du modèle d'écoulement convectif.

L'ensemble des valeurs de calibration relatives au modèle convectif est repris au **Tableau III-6**, ci-dessous. La **Figure III-21** représente une synthèse des différents résultats concernant la calibration du modèle convectif.

Sous-système	N° du reach	Longueur (m)	Nsegm	C.A	Q (l/sec)	a_L (m)	D_L (m ² /sec)	A (m ²)	A_s (m ²)	α (sec ⁻¹)
NUT-TQF	1	210	420	C.S	19,0	1	0,0126	1,45	0,3	1,0E-04
TQF-GDS	2	560	1120			1	0,00905	2,1	1,5	1,5E-04
GDS-TDL	3	400	800			10	0,1727	1,1	0,9	4,5E-05

Tableau III-6 : Synthèse des données de calibration pour les 3 reaches du modèle convectif.

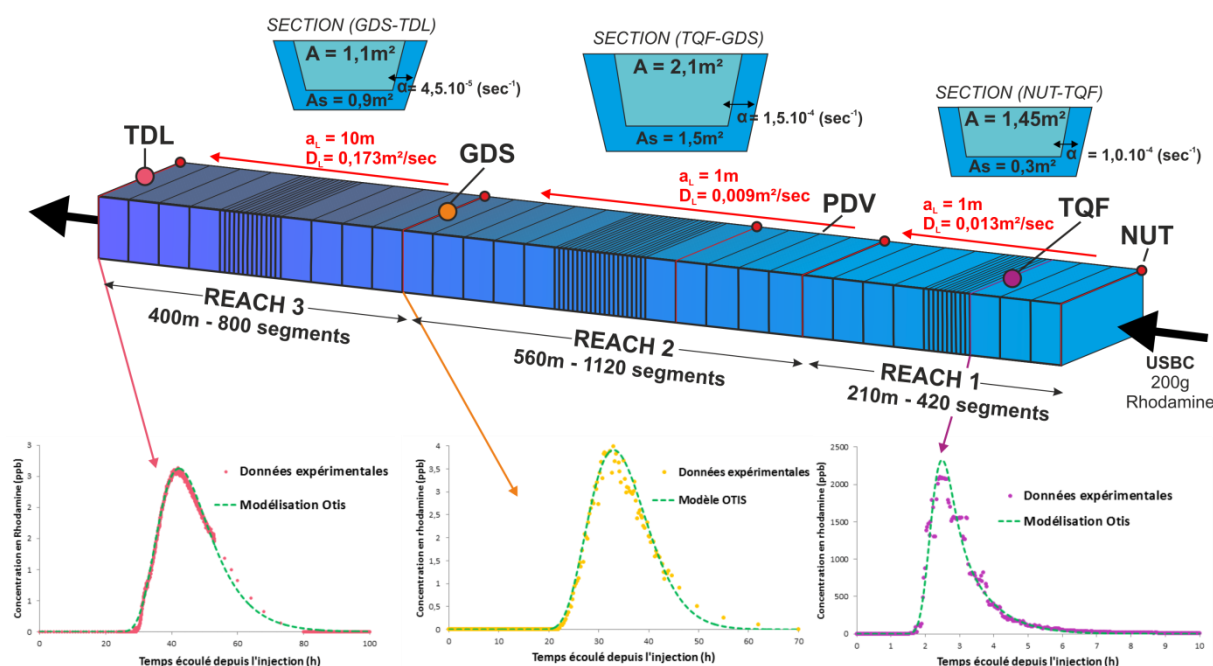


Figure III-21 : Synthèse des résultats de la calibration OTIS du modèle convectif – Pour chaque reach, les paramètres A , A_s , a_i , D_L et α ont été calibrés.

III.5.2.3. Sensibilité du modèle convectif

Afin d'évaluer la sensibilité du modèle vis-à-vis des paramètres calibrés avec OTIS, différents tests de sensibilité ont été réalisés. L'objectif de cette évaluation est de déterminer graphiquement les paramètres ayant le plus d'influence sur le modèle et de proposer une gamme de précision propre à chaque paramètre (Bonniver, 2011).

Une première série de tests a été réalisée sur le modèle du reach 1 uniquement (NUT-TQF). La sensibilité de A , A_s , D_L et α a été évaluée successivement en maintenant les trois autres paramètres constants. Pour chaque paramètre testé, différentes courbes de restitution du traceur ont été modélisées pour une variation de ± 5 , 10, 20 et 50 % de la valeur originale. L'intégralité des valeurs testées est reprise dans le **Tableau III-7**.

À la vue des différentes courbes de sensibilité des paramètres (**Figure III-22**), la section d'écoulement principal est très clairement le paramètre le plus sensible du modèle. Une variation, même légère (± 5 %), de la valeur de A , modifie les paramètres principaux de la courbe de restitution, à savoir le temps d'arrivée première, le temps modal et la concentration modale. La valeur de section calculée est correcte avec une précision de ± 5 %.

Les variations des trois autres paramètres influencent de manière beaucoup plus modérée le modèle OTIS. Le coefficient de dispersion longitudinale (D_L) influence principalement la concentration modale et le temps de première arrivée du traceur. Une dispersion longitudinale plus faible va induire une plus forte concentration du nuage de traceur et une tendance ascendante de la courbe plus abrupte. Les effets de retard sont peu ou pas influencés par ce paramètre. Les variations de la section de la zone d'emménagement temporaire (A_s) ainsi que du coefficient d'échange (α) montrent une influence principalement sur les effets de retard de la courbe. Au plus les effets de retard sont

importants et au plus la concentration modale est faible. Pour ces trois paramètres (A_s , D_L et α), les valeurs calibrées sont considérées comme correctes avec une précision de $\pm 20\%$.

Paramètre testé	x	x-50%	x-20%	x-10%	x-5%	x+5%	x+10%	x+20%	x+50%	Paramètres constants			
										A	D_L	A_s	α
A	1,45	0,725	1,16	1,305	1,3775	1,5225	1,595	1,74	2,175		0,013	0,3	1,00E-04
D_L	0,01264	0,0063	0,01011	0,0114	0,0120	0,01327	0,0139	0,0152	0,0190	1,45		0,3	1,00E-04
A_s	0,3	0,15	0,24	0,27	0,29	0,32	0,33	0,36	0,45	1,45	0,013		1,00E-04
α	1,0E-04	5,0E-05	8,0E-05	9,0E-05	9,5E-05	1,05E-04	1,1E-04	1,2E-04	1,5E-04	1,45	0,013	0,3	

Tableau III-7 : Synthèse des valeurs de paramètres utilisées dans le test de sensibilité pour le reach 1 - x : valeur originale du paramètre, A : section d'écoulement principal, D_L : coefficient de dispersion longitudinale, A_s : section de la zone d'emménagement, α : coefficient d'échange avec la zone d'emménagement.

Une seconde série de tests a été réalisée sur le modèle convectif complet (3 reaches). Seul le paramètre « A » a été testé pour les différents reaches. En effet, il s'agit du paramètre le plus sensible d'après les tests individuels réalisés ci-dessus. La question est de savoir quel reach a le plus d'influence sur le modèle convectif complet. Les valeurs de variabilité du test sont reprises au **Tableau III-8**, ci-dessous, tandis que différentes courbes de test sont représentées dans la **Figure III-23**.

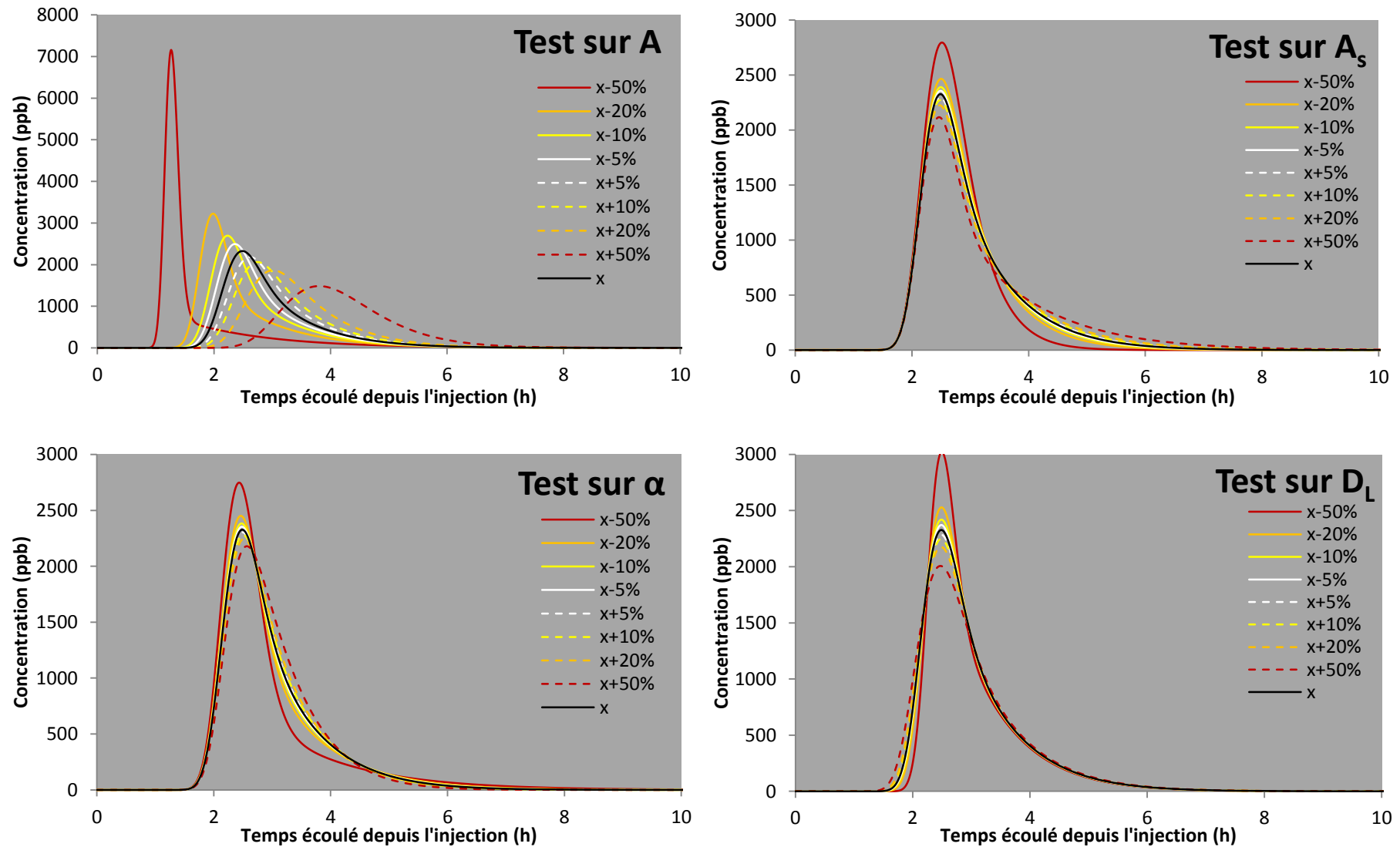
La section d'écoulement principal du reach 2 (TQF-GDS) est la plus sensible du modèle convectif. Une variation de 10 à 20 % de cette valeur de section entraîne une modification importante du temps d'arrivée première et de la concentration modale. Une augmentation de section diminue la vitesse d'écoulement, ce qui retarde l'arrivée première. Cette même augmentation va diminuer l'importance de la zone d'emménagement temporaire par rapport à celle du conduit principal. Ceci a pour effet de limiter les effets de retard et de resserrer la courbe en augmentant la concentration modale.

Le modèle est également très sensible à la section du reach 3. Une variation de plus de 20 % de cette section entraîne des modifications sur le temps d'arrivée première et, dans une moindre mesure, sur la concentration modale. Dans ce cas, une augmentation de la taille du conduit principal contribue à augmenter la dispersion et donc à diminuer la concentration modale.

La section du reach 1 influence peu le modèle complet convectif. Seul le temps d'arrivée première est légèrement modifié pour une variation de $\pm 50\%$ de la section.

Reach testé	x	x-50%	x-20%	x-10%	x-5%	x+5%	x+10%	x+20%	x+50%	Paramètres constants		
										Reach 1	Reach 2	Reach 3
Reach 1	1,45	0,725	1,16	1,305	1,3775	1,5225	1,595	1,74	2,175		2,1	1,1
Reach 2	2,1	1,05	1,68	1,89	1,995	2,205	2,31	2,52	3,15	1,45		1,1
Reach 3	1,1	0,55	0,88	0,99	1,05	1,16	1,21	1,32	1,65	1,45	2,1	

Tableau III-8 : Synthèse des valeurs de paramètres utilisées dans le test de sensibilité de A pour le modèle convectif complet - x : valeur originale de la section d'écoulement principal (m^2).


 Figure III-22 : Courbes modélisées des tests de sensibilité pour A , A_s , D_L et α (Modèle convectif – reach 1).

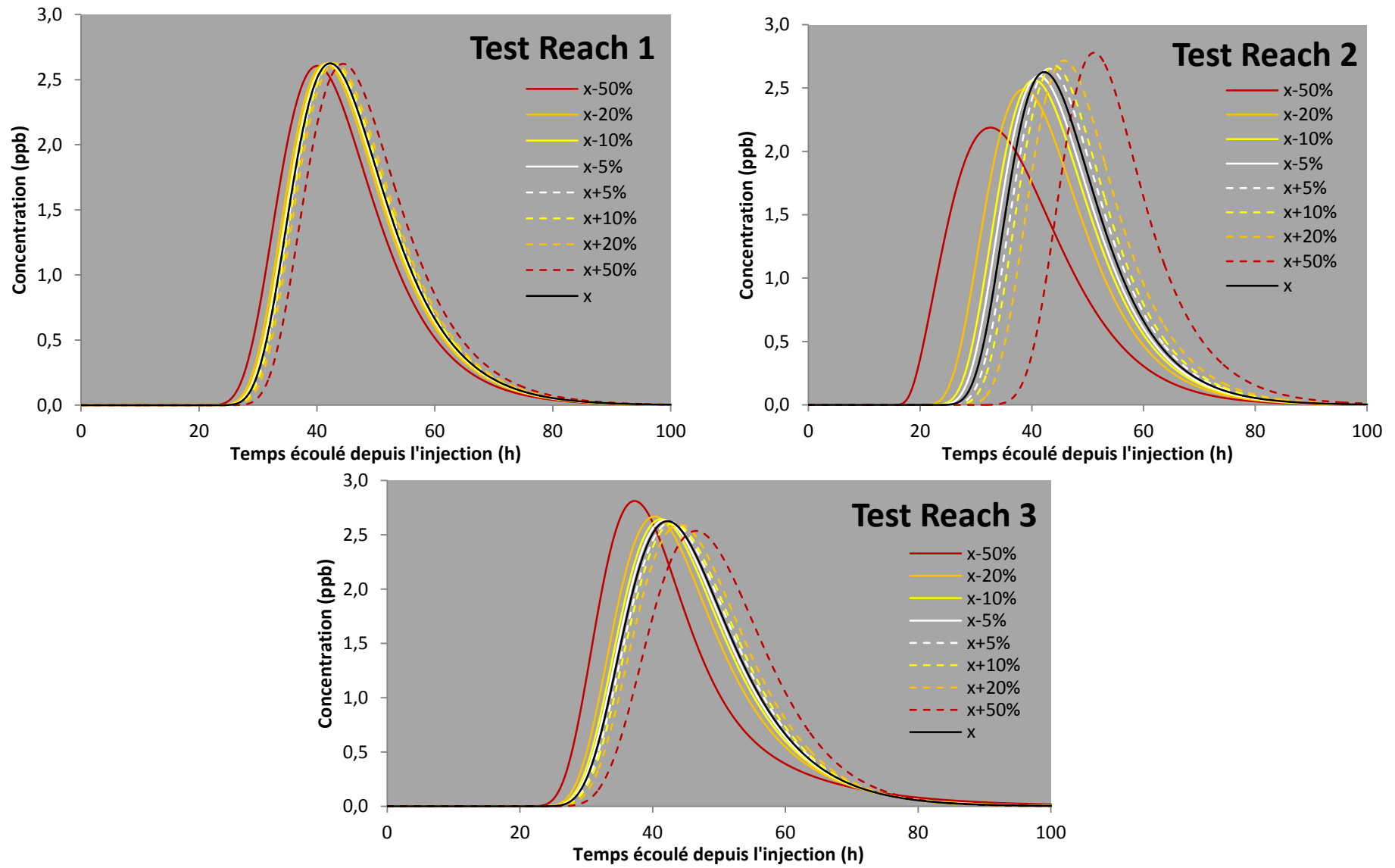


Figure III-23 : Courbes modélisées des tests de sensibilité du paramètre A pour les différents reaches du modèle convectif.

III.5.3. Étape 2 : Modélisation du transport diffusif

Le modèle conceptuel développé voudrait que la zone de transport diffusive du sous-système « Trou qui Fume – Puits des Vaux » soit considérée uniquement comme une zone d'emmagasinement temporaire. Néanmoins, OTIS ne permet pas de modéliser un tel concept. Une zone d'écoulement principal est nécessaire pour avoir un transport du soluté vers l'aval par convection et dispersion. Il est donc nécessaire de considérer une zone de d'écoulement principale dans ce modèle diffusif.

III.5.3.1. Construction du modèle dispersif

Pour le modèle diffusif, 4 reaches ont été considérés au lieu de trois (**Figure III-24**).

- Le premier (Chantoir des Nutons – lac du Trou qui Fume) est similaire à celui du modèle convectif, les paramètres calibrés précédemment seront conservés ;
- le second représente la zone noyée « lac du Trou qui Fume – Puits des Vaux », d'une longueur de 150 mètres représentés par 300 segments de 0,5 mètre ;
- le troisième représente le tronçon « Puits des Vaux – Galerie des Sources », d'une longueur de 410 mètres représentés par 820 segments de 0,5 mètre ;
- le dernier (Galerie des Sources – Trou de la Loutre) est similaire à celui du modèle convectif, les paramètres calibrés précédemment seront conservés.

On a choisi cette discrétisation (reaches 2 et 3) pour plusieurs raisons :

- la zone noyée semble continue à partir du lac du Trou qui Fume jusqu'au Puits des Vaux, mais aucune information ne permet d'affirmer qu'elle se prolonge plus de quelques mètres à l'aval du Puits des Vaux ;
- les modélisations Qtracer2 ont systématiquement indiqué une diminution de section lorsque le traceur emprunte le tronçon à l'aval du Puits des Vaux (PDV-GDS).

Sans informations complémentaires, il a été décidé de limiter à 150 mètres la longueur de la zone noyée (reach 2) et de considérer un conduit uniquement convectif pour la zone aval (reach 3). Les paramètres calibrés entre le Puits des Vaux et la Galerie des Sources avec le modèle convectif ont été conservés pour le reach 3 du modèle diffusif.

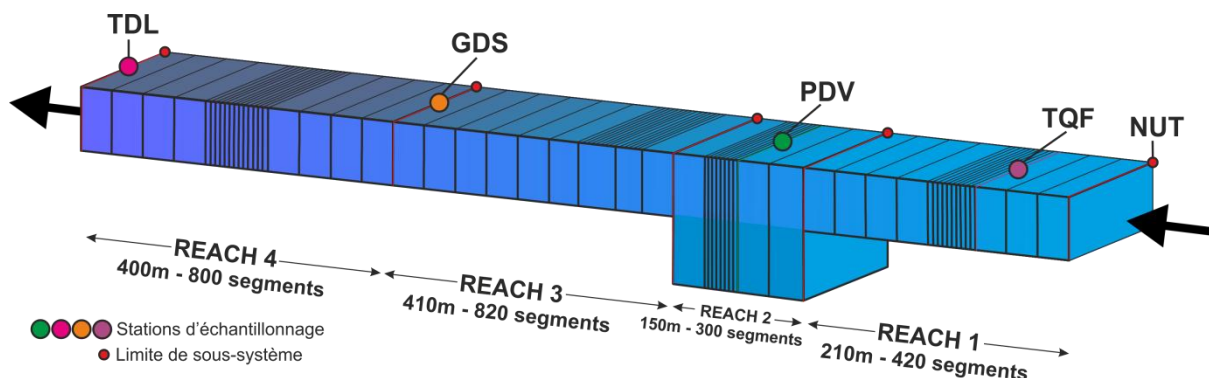


Figure III-24 : Schéma de discrétisation du modèle d'écoulement diffusif.

III.5.3.2. Calibration du modèle diffusif

Le modèle de transport diffusif reprend les calibrations du modèle convectif pour les sous-systèmes ne présentant pas de double mode de transport. Pour les zones restantes (sous-système « Trou qui Fume – Puits des Vaux »), c'est la courbe « diffusive » des stations présentant une double courbe de restitution qui a été utilisée.

III.5.3.2.1. Reach 1 : Sous-système « Chantoir des Nutons – Trou qui Fume »

Ce sous-système est considéré comme identique dans les deux modèles. Les paramètres de calibration modélisés précédemment ont donc été conservés comme tels (**Tableau III-9**).

Reach	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol_s	Vol_{Tot}	α	Cr	Pe
	m ³ /sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
1 NUT-TQF	0,019	1,45	305	0,0126	1	0,0126	0,3	63	368	1,0E-04	0,0073	0,5

Tableau III-9 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs au reach 1 du modèle d'écoulement diffusif.

III.5.3.2.2. Reaches 2 et 3 : Sous-systèmes « Trou qui Fume – Puits des Vaux » et « Puits des Vaux – Galerie des Sources »

Pour les raisons explicitées préalablement, la courbe de restitution au Puits des Vaux n'a pas été utilisée. Un seul modèle a donc été réalisé afin de calibrer ces deux reaches. La seconde courbe de restitution à la Galerie des Sources ainsi que les paramètres des reaches 1 et 3, préalablement calibrés, ont été utilisés. La **Figure III-25** présente la courbe de restitution modélisée pour les reaches 1 à 3, ainsi que les données expérimentales mesurées à la Galerie des Sources. Le **Tableau III-10** reprend les valeurs des paramètres calibrés avec OTIS pour les reaches 2 et 3.

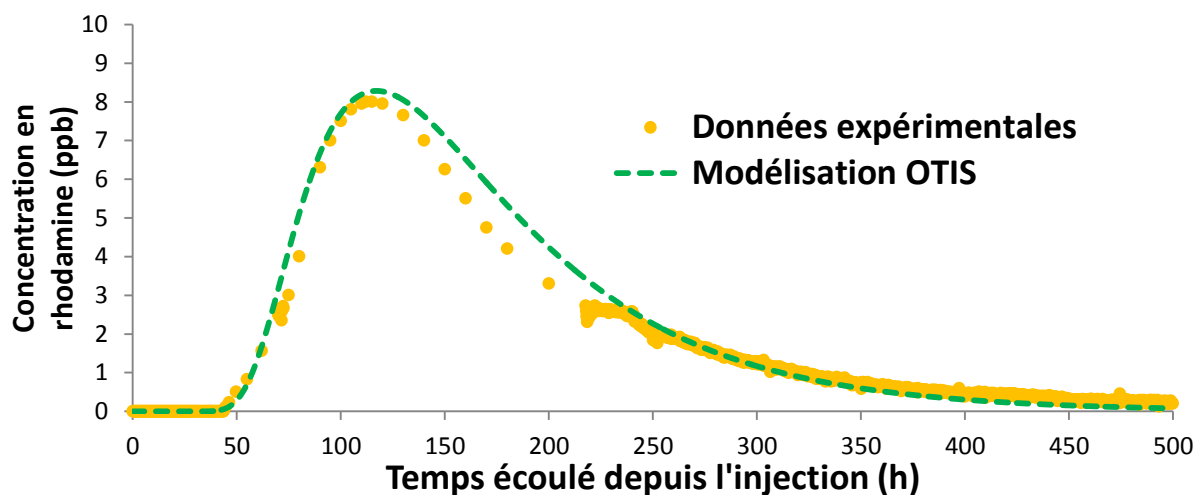


Figure III-25 : Courbe de restitution modélisée et données expérimentales pour les reaches 1 à 3 (NUT-GDS).

Reach	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol_s	Vol_{Tot}	α	Cr	Pe
	m ³ /sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
2 TQF-PDV	0,019	25	3750	0,0007	30	0,0228	40	6000	9750	1,0E-03	0,004	0,016
3 PDV-GDS		2,1	861	0,009	1	0,00905	1,5	615	1476	1,5E-04	0,052	0,5

Tableau III-10 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs aux reaches 2 et 3 du modèle diffusif.

III.5.3.2.3. Reach 4 : Sous-système « Galerie des Sources – Trou de la Loutre »

Ce sous-système est considéré comme identique dans les deux modèles. Les paramètres de calibration modélisés précédemment ont donc été conservés comme tels (**Tableau III-11**).

Reach	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol _s	Vol _{Tot}	α	Cr	Pe
	m ³ /sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
4 GDS-TDL	0,019	1,1	440	0,0173	10	0,1727	0,9	360	800	4,5E-05	0,099	0,05

Tableau III-11 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs au reach 4 du modèle d'écoulement diffusif.

À l'aide des paramètres de calibrations des 4 reaches, la courbe issue du transport diffusif échantillonnée au Trou de la Loutre a été modélisée. Si la calibration a été réalisée correctement, ce dernier modèle devrait s'approcher de la courbe expérimentale mesurée au Trou de la Loutre. La **Figure III-26**, ci-dessous, montre la comparaison entre le modèle OTIS et la courbe expérimentale mesurée au Trou de la Loutre.

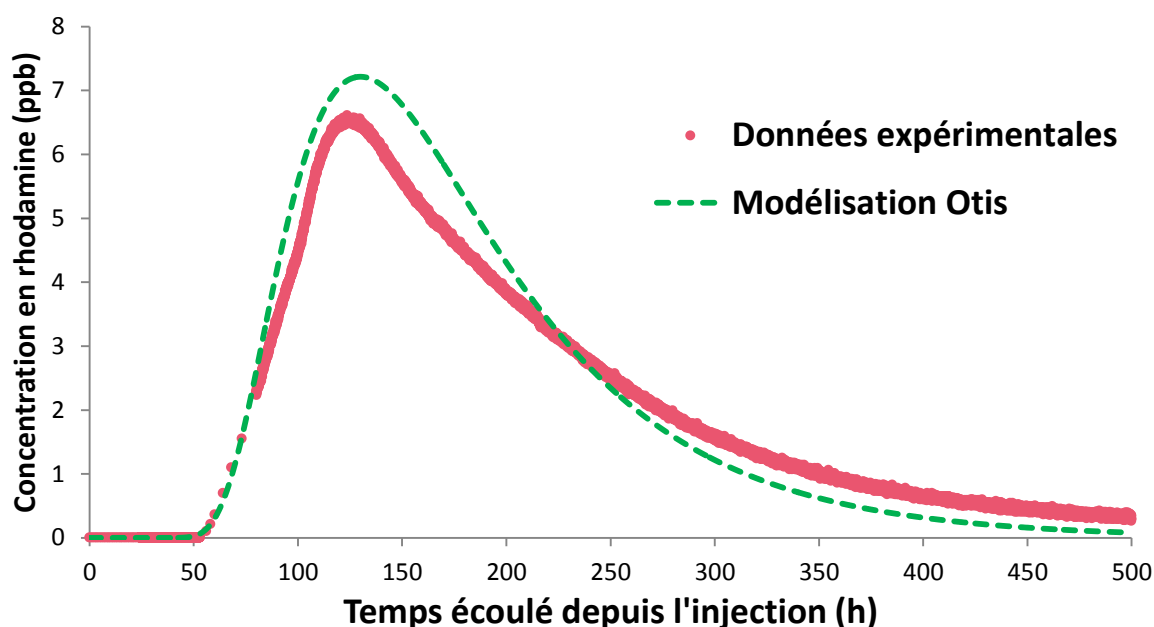


Figure III-26 : Courbe de restitution modélisée et données expérimentales pour le modèle diffusif 4 reaches (NUT-TDL).

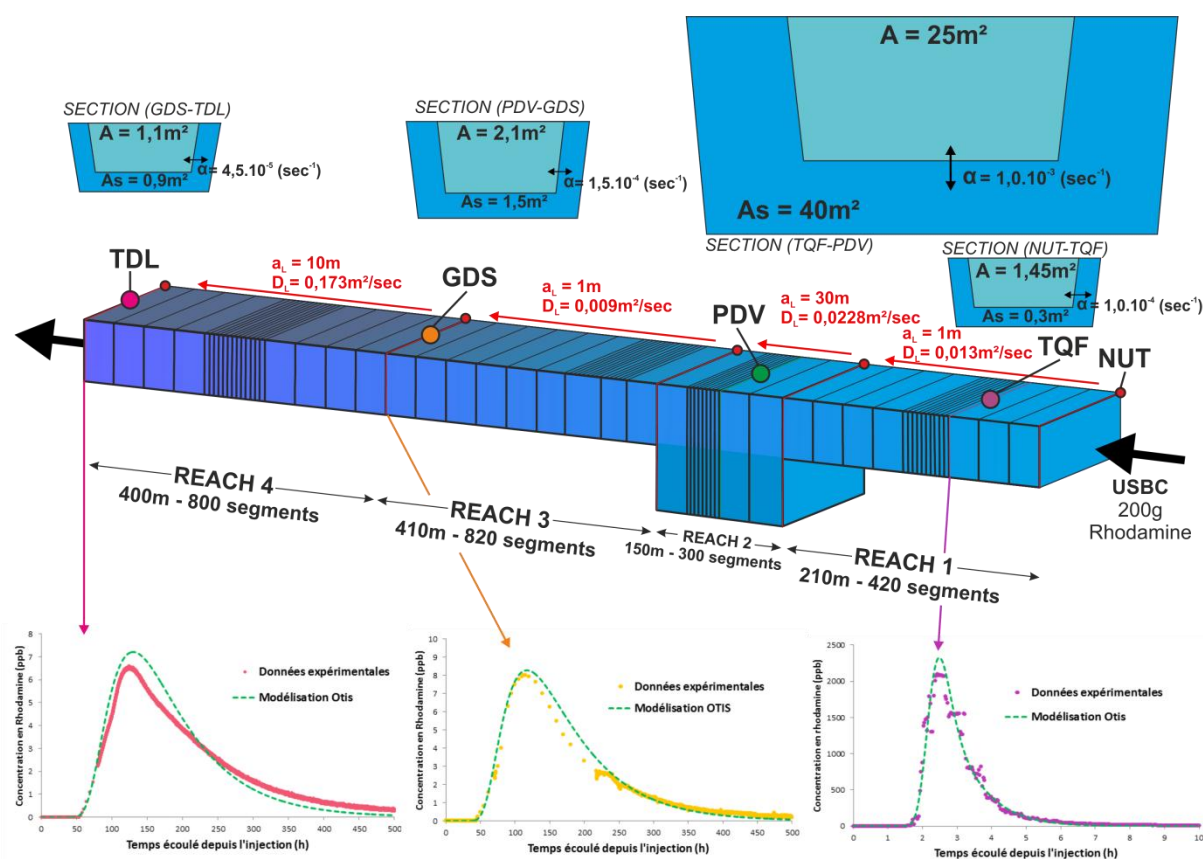
Le résultat est satisfaisant puisque le modèle reproduit fidèlement le temps d'arrivée première ainsi que l'allure générale de la courbe :

- concentration modale observée de 6,6ppb, modélisée à 7,1ppb, erreur relative de 8,3% ;
- effets de retard similaires sur les deux courbes tenant compte de l'erreur sur la concentration modale.

À ce stade, calibrer les différents paramètres pour tenter d'avoir une courbe modélisée s'approchant le plus possible de la courbe observée serait un non-sens. En effet, tous les reaches ont déjà été calibrés avec précision individuellement et les modifier serait prendre en défaut toutes ces calibrations. Les résultats du modèle diffusif sont synthétisés dans le **Tableau III-12** et la **Figure III-27**.

Sous-système	N° du Reach	Longueur (m)	Nsegm	C.A	Q (l/sec)	a_L (m)	D_L (m²/sec)	A (m²)	A_s (m²)	α (sec⁻¹)
NUT-TQF	1	210	420	C.S	19,0	1	0,0126	1,45	0,3	1,0E-04
TQF-PDV	2	150	300			30	0,0228	25	40	1,0E-03
PDV-GDS	3	560	1120			1	0,00905	2,1	1,5	1,5E-04
GDS-TDL	4	400	800			10	0,1727	1,1	0,9	4,5E-05

Tableau III-12 : Synthèse des données de calibration pour les 4 reaches du modèle diffusif.


 Figure III-27 : Synthèse des résultats de la calibration OTIS du modèle dispersif – Pour chaque reach, les paramètres A, A_s , a_L , D_L et α ont été calibrés.

III.5.3.3. Sensibilité du modèle diffusif

Le modèle diffusif étant exclusivement réalisé dans le but de caractériser la zone noyée de la section « Trou qui Fume – Puits des Vaux », c'est sur les paramètres de cette section que les tests de sensibilités ont été réalisés. Ces tests ont été basés sur le modèle dispersif complet.

Reach 2	x	x-90%	x-50%	x-20%	x-10%	x-5%	x+5%	x+10%	x+20%	x+50%	Paramètres constants			
											A	D_L	A_s	α
A	25		12,5	20	22,5	23,75	26,25	27,5	30	37,5		0,0228	40	0,001
D_L	0,0228		0,0114	0,0182	0,0205	0,0217	0,0239	0,0251	0,027	0,0342	25		40	0,001
A_s	40		20	32	36	38	42	44	48	60	25	0,0228		0,001
α	0,001	0,0001	0,0005								25	0,0228	40	

 Tableau III-13 : Synthèse des valeurs de paramètres utilisés dans le test de sensibilité pour le reach 2 – x : valeur originale du paramètre, A : section d'écoulement principal, D_L : coefficient de dispersion longitudinale, A_s : section de la zone d'emménagement, α : coefficient d'échange avec la zone d'emménagement.

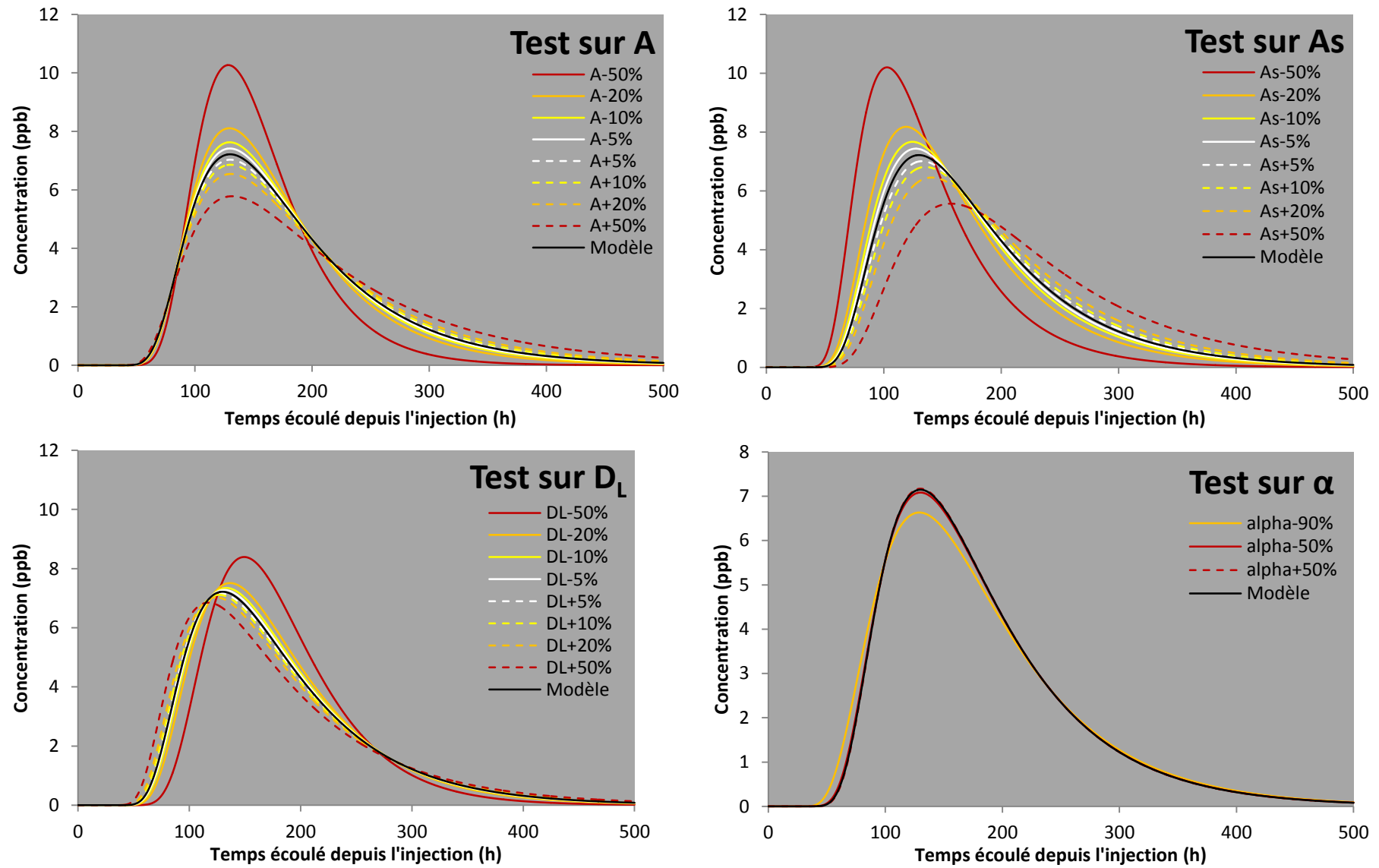


Figure III-28 : Courbes modélisées des tests de sensibilité pour A, A_s , D_L et α (modèle diffusif complet).

Les résultats de ces tests montrent que les sections modélisées sont, de loin, les paramètres les plus sensibles du modèle. Une variation de plus de 10 % de ces paramètres (A et A_s) suffit pour modifier de façon importante les temps d'arrivée première, les concentrations modales et l'allure des effets de retard. La dispersion longitudinale ne modifie le modèle de façon importante que pour une variation de $\pm 50\%$, tandis que le paramètre α nécessite une variation de plus de 90 % pour qu'une modification du modèle soit visible.

III.5.4. Étape 3 : Unification des deux modèles d'écoulement

En additionnant les deux modèles, on obtient une courbe modélisée pour les deux processus de transport simultanément. La **Figure III-29** représente le modèle général pour la courbe mesurée à la Galerie des Sources tandis que la **Figure III-30** représente le modèle pour le Trou de la Loutre.

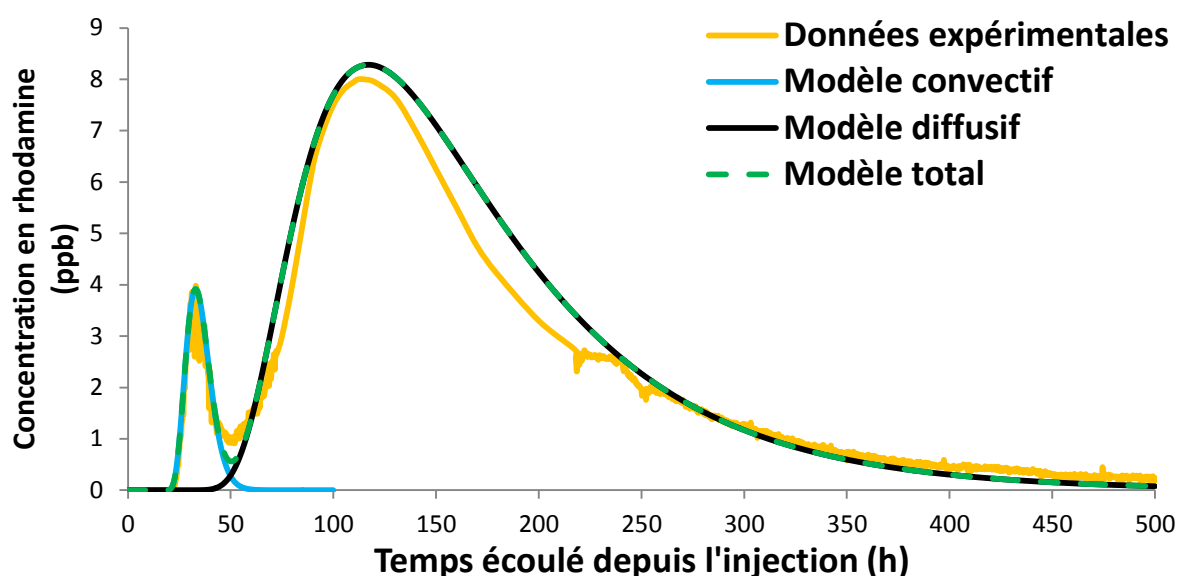


Figure III-29 : Courbes des modèles convectif, diffusif et total comparées aux données expérimentales mesurées à la Galerie des Sources lors du traçage n° 6.

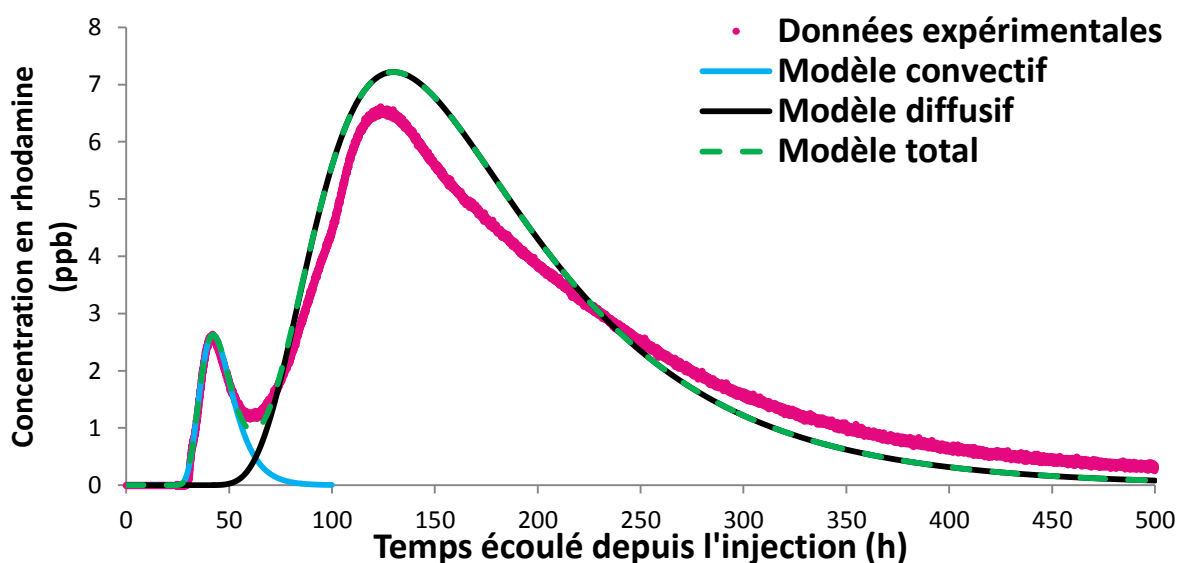


Figure III-30 : Courbes des modèles convectif, diffusif et total comparées aux données expérimentales mesurées au Trou de la Loutre lors du traçage n° 6.

La **Figure III-31** schématise les résultats du modèle total en termes de dimensionnement des différents sous-systèmes du réseau karstique actif. Le volume total modélisé est de 13 014 m³ pour 1 170 m de long, soit une section moyenne de 11,12 m². Ce résultat est en parfaite correspondance avec la modélisation Qtracer2 du réseau complet réalisée à partir de la courbe enregistrée au Trou de la Loutre. Qtracer2 avait donné une section moyenne de 11,1 m² pour un volume total de 12 996 m³. Cette bonne correspondance indique que le modèle OTIS est cohérent dans sa globalité. L'avantage d'OTIS est d'avoir pu dimensionner les différents sous-systèmes grâce à la discrétisation du réseau.

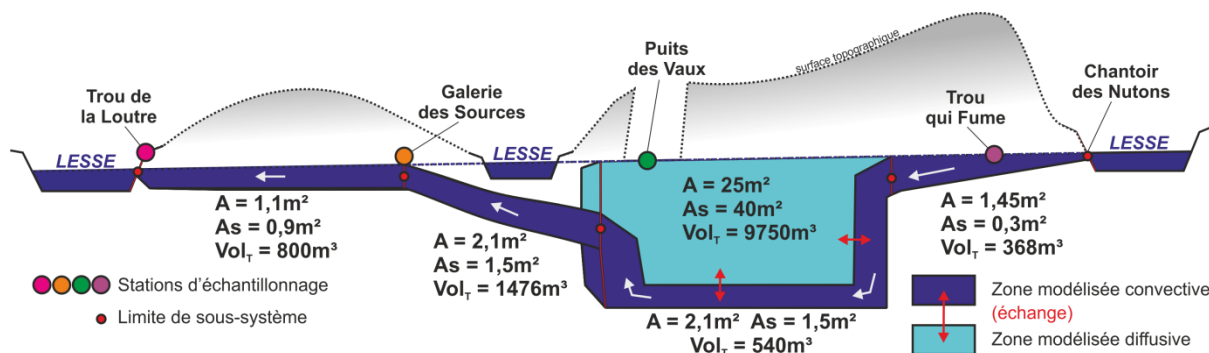


Figure III-31 : Coupe schématique du réseau complet de la Lesse souterraine reprenant les zones convectives et diffuses ainsi que les paramètres géométriques (sections d'écoulement et volumes totaux) modélisés avec OTIS.

III.5.5. Limites du modèle

Le double modèle d'écoulement et de transport développé dans ce cas présente l'inconvénient de diviser « physiquement » un processus qui ne l'est pas dans la réalité. OTIS est en effet incapable de simuler une division du nuage de traceur suivie de deux types de transports différents mais adjacents. Le processus réel implique des échanges permanents de flux entre les deux « systèmes » d'écoulement, ce qui ne saurait être modélisé avec OTIS.

Il est également impossible d'évaluer l'évolution de la concentration en soluté dans une zone d'emménagement temporaire. Les données issues de la station d'échantillonnage du Puits des Vaux restent donc inutilisables avec OTIS.

Enfin, malgré les résultats très satisfaisants de l'ensemble des résultats, le modèle total reste probablement limité au cas du traçage n° 6. Une période de monitoring plus longue est en effet nécessaire afin de comprendre le fonctionnement du système sous différents régimes hydrologiques. La réalisation de plusieurs séries de traçages dans les mêmes conditions de débits permettra de préciser une éventuelle régularité de ce fonctionnement d'année en année. L'utilisation d'autres outils de modélisation de processus hydrauliques est également une option envisageable pour la suite de l'étude du système de Furfooz.

III.5.6. Validation du modèle

III.5.6.1. Modélisation du système « Galerie des Sources – Trou de la Loutre »

Dans le but de confirmer les valeurs calibrées, deux modélisations supplémentaires ont été réalisées sur le tracé du dernier tronçon : Galerie des Sources – Trou de la Loutre. Ces deux

calibrations supplémentaires ont été réalisées à partir des essais de traçage n° 1 et 7, avec deux conditions de débits différentes de celle du modèle principal. Le traçage n° 1 s'est déroulé à un débit moyen (mesuré à la Galerie des Sources) de 13,3 litres/sec tandis que le traçage n° 7 s'est déroulé à un débit moyen de 22,0 litres/sec. La construction du modèle pour ce tronçon est exactement similaire à celle réalisée pour le modèle principal. Les caractéristiques des 3 modèles sont reprises dans le **Tableau III-14**.

Sous-Système	Long. (m)	Nsegm	Δt (h)	USBC	Q (l/sec)	a_L (m)	D_L (m ² /sec)	A (m ²)	As (m ²)	α (sec ⁻¹)
GDS-TDL	400	800	0,0008	C.S	13,3	à calibrer				
					19,0	10	0,172	1,1	0,9	4,5E-05
					22,0	à calibrer				

Tableau III-14 : Caractéristiques relatives à la discrétisation des modèles « Galerie des Sources – Trou de la Loutre » pour différentes conditions de débit – Nsegm : nombre de segments, Δt : pas de temps d'intégration, USBC : condition limite amont, Q : débit moyen, a_L : dispersivité longitudinale, D_L : coefficient de dispersion longitudinale, A : section de la zone d'écoulement principale, As : section de la zone d'emménagement, α : coefficient d'échange.

III.5.6.1.1. Modélisation du traçage n° 1 (débit moyen de 13,3 litres/sec)

Le traçage n° 1 a consisté en l'injection de 25 grammes de rhodamine à la Galerie des Sources. Les données expérimentales ainsi que la courbe modélisée avec OTIS sont présentées à la **Figure III-32**. Les paramètres de calibration du modèle OTIS sont synthétisés dans le **Tableau III-15**.

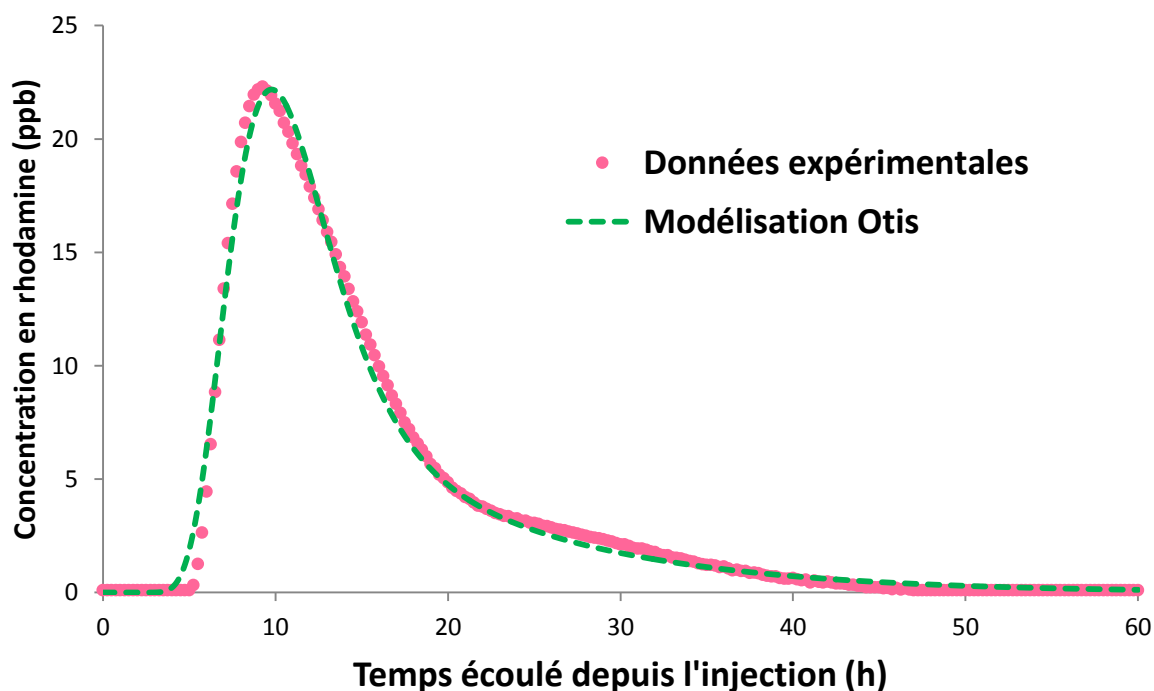


Figure III-32 : Courbe de restitution modélisée et données expérimentales du traçage n° 1 (GDS-TDL).

Site	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol _s	Vol _{Tot}	α	Cr	Pe
	m ³ /sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
GDS-TDL	0,0133	1,35	540	0,0096	20	0,192	0,5	200	740	1,2E-05	0,05	0,025

Tableau III-15 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs au traçage n° 1.

III.5.6.1.2. Modélisation du traçage n° 7 (débit moyen de 22,0 litres/sec)

Le traçage n° 7 a été réalisé pour un débit plus important. Il a consisté en l'injection de 20 grammes d'uranine à la Galerie des Sources. Les données expérimentales ainsi que la courbe modélisée avec OTIS sont présentées à la **Figure III-33**. Les paramètres de calibration du modèle sont synthétisés dans le **Tableau III-16**.

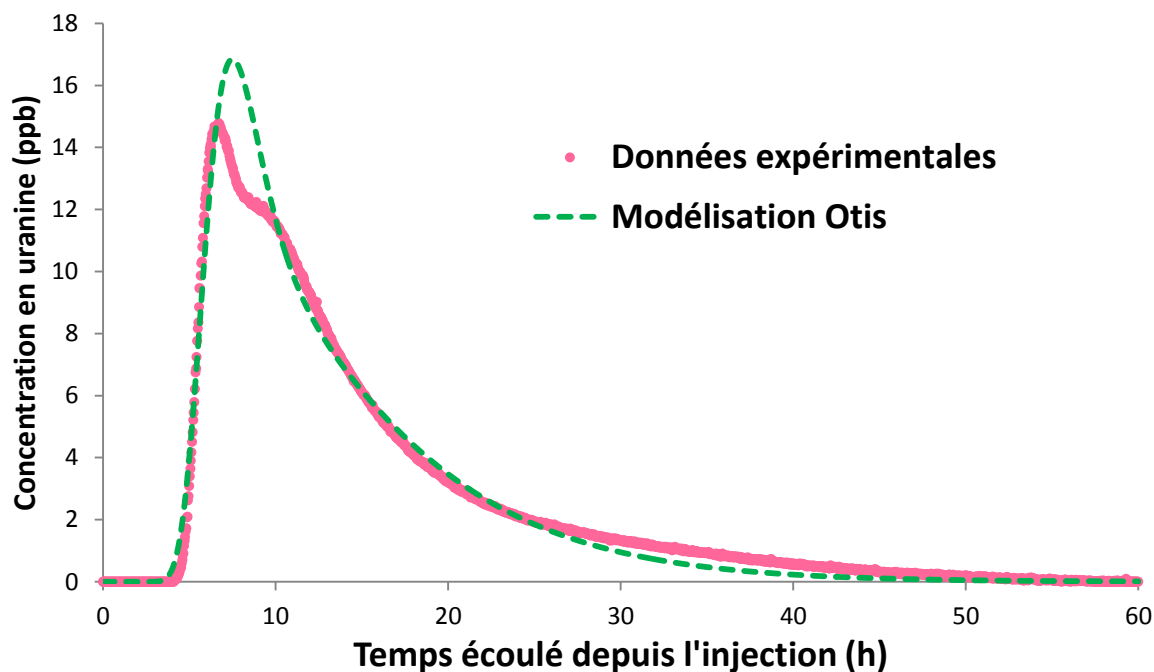


Figure III-33 : Courbe de restitution modélisée et données expérimentales du traçage n° 7 (GDS-TDL).

Site	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol_s	Vol_{Tot}	α	Cr	Pe
	m ³ /sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
GDS-TDL	0,022	1,55	620	0,0142	10	0,142	1,1	440	1060	4,5E-05	0,08	0,05

Tableau III-16 : Synthèse des données de calibration et des résultats relatifs au traçage n° 7.

III.5.6.2. Discussion des résultats de la validation du modèle

Le **Tableau III-17**, reprend la synthèse des résultats de la modélisation pour différentes conditions de débit. Tous les paramètres restent dans la même gamme de valeur pour les trois modèles, ce qui montre la cohérence du modèle développé. Une très bonne corrélation est également observée entre l'augmentation progressive du débit et l'augmentation de la section et du volume d'écoulement.

Site	Q	A	Vol	Vitesse	a_L	D_L	A_s	Vol_s	Vol_{Tot}	α	Cr	Pe
	l/sec	m ²	m ³	m/sec	m	m ² /sec	m ²	m ³	m ³	sec ⁻¹		
GDS-Loutre	13,3	1,35	540	0,0096	20	0,192	0,5	200	740	1,2E-05	0,05	0,025
	19,0	1,1	440	0,0173	10	0,1727	0,9	360	800	4,5E-05	0,099	0,05
	22,0	1,55	620	0,0142	10	0,142	1,1	440	1060	4,5E-05	0,08	0,05

Tableau III-17 : Comparaison des résultats des trois modèles GDS-TDL pour différents débits de la Lesse souterraine.

Le premier sous-système du réseau (Chantoir des Nutons – Trou qui Fume) ne nécessite pas vraiment de validation, étant donné qu'il est aisément accessible dans son entièreté, sauf pour des conditions de débit exceptionnellement élevées. Le plus important serait de pouvoir valider la partie centrale du modèle (entre le lac du Trou qui Fume et la Galerie des Sources), mais ce travail est rendu compliqué par le fait que le système ne semble pas présenter le même comportement pour des conditions de débits variables. Ceci rend donc malaisé la comparaison entre différents modèles.

III.6. Conclusions de la modélisation OTIS

Le logiciel OTIS a été utilisé afin de modéliser et dimensionner l'écoulement au sein du système de la Lesse souterraine de Furfooz. Ce modèle d'écoulement unidimensionnel est basé sur les principes d'emménagement temporaire (Bencala et Walters, 1983 in Bonniver, 2011). Il a été choisi car il permet de rendre compte de la variabilité des caractéristiques de transport et d'écoulement entre les différents tronçons composant le système souterrain.

Les observations de terrain, ainsi que les résultats des essais de traçage, ont permis de développer un modèle conceptuel de la Lesse souterraine. Celui-ci repose sur un fonctionnement bimodal du système d'écoulement au niveau de la zone noyée du sous-système « Trou qui Fume – Puits des Vaux ». À cet endroit, une partie du flux serait emportée rapidement par convection, dans le drain principal, tandis qu'une autre partie serait ralentie dans un large volume d'eau annexe, peu mobile. Entre ces deux compartiments d'écoulement, il se déroulerait des processus d'échanges de flux et de masse, provoquant un stockage temporaire du traceur dans ce volume capacitif. Ce fonctionnement particulier serait à l'origine d'un dédoublement des pics de restitution vers l'aval, tel qu'observé lors des traçages n° 6 et 9. Le traçage n° 6, réalisé en mars 2013, a été choisi comme base pour le travail de modélisation avec OTIS.

OTIS ne permettant pas de modéliser le processus de diffuence observé, il a été choisi de séparer le modèle conceptuel global en deux sous-modèles : l'un représentant le transport convectif, l'autre représentant le transport diffusif, dû à l'effet de la zone d'eau immobile annexée au drain.

La calibration des deux modèles a été réalisée en ajustant les courbes modélisées aux données expérimentales et ce, successivement pour chaque sous-système du réseau. Un modèle convectif à 3 reaches et un modèle diffusif à 4 reaches ont ainsi été réalisés. Au final, l'addition de ces deux modèles a permis de dresser un modèle global qui s'approche de manière satisfaisante des données expérimentales mesurées à la Galerie des Sources et au Trou de la Loutre.

Les résultats montrent que le réseau possède les caractéristiques suivantes :

- la majorité du tracé (environ 87 %) est formée uniquement d'un conduit karstique unidimensionnel de taille réduite (**2 - 3,6 m²**) dans lequel le processus de transport dominant est la convection. La vitesse d'écoulement y est rapide ;
- une portion réduite du tracé (tronçon Trou qui Fume – Puits des Vaux) est formée de ce même drain principal, auquel vient s'annexer une vaste zone noyée (d'une section totale d'environ **65 m²**) au sein de laquelle la vitesse est fortement réduite et les processus de diffusion sont importants. Ce système annexe induit un effet de stockage temporaire important.

Les tests de sensibilité réalisés sur les différents modèles ont montré que la section principale d'écoulement ainsi que la section de la zone d'emménagement temporaire représentent les paramètres les plus sensibles. Dans tous les cas, les valeurs des sections peuvent être considérées comme représentatives avec une marge d'erreur entre ± 5 et 20 %. Ceci démontre que le logiciel OTIS s'avère performant dans la précision du dimensionnement des zones d'écoulement, ce qui était l'objectif principal de ce travail de modélisation.

La validation d'une partie du modèle avec des données expérimentales complémentaires a permis de confirmer son bon fonctionnement pour des conditions hydrologiques variées. L'idéal serait de parvenir à une validation du système complet grâce à de nouvelles données. Ce travail est compliqué par le fonctionnement intrinsèque du système d'écoulement pour différentes conditions de débit. De futurs essais de traçage permettront sans doute de préciser le fonctionnement du réseau pour les différentes conditions hydrologiques.

Il a pu être démontré que le logiciel OTIS est un outil de travail fiable et précis pour le dimensionnement des réseaux karstiques actifs, malgré le fait qu'il ait été développé, à la base, pour la modélisation du transport en rivières superficielles. Ceci encourage l'application de la méthode à d'autres systèmes karstiques du type de Han-sur-Lesse ou Furfooz. Tout modèle ayant ses limites, l'utilisation d'OTIS reste réservée à des cas simples en termes de comportement hydraulique du système karstique. Pour des cas plus complexes, d'autres logiciels pourraient être utilisés, c'est le cas d'EPANET (Rossman, 2000).

EPANET est un logiciel de simulation hydraulique permettant la construction de systèmes complexes de drains et de réservoirs interconnectés. Il est capable de modéliser l'évolution de nombreuses variables, telles que les flux d'eau, la pressurisation de systèmes, les hauteurs d'eau, les concentrations d'espèces chimiques..., et ce, à travers l'ensemble du réseau modélisé. EPANET est développé à la base comme un outil de recherche pour améliorer la compréhension des mouvements et du devenir de l'eau de consommation à travers un réseau. Il peut, cependant, être utilisé de bien d'autres manières comme pour calibrer des modèles hydrauliques complexes comme dans le cas d'un réseau karstique.

Conclusions générales et perspectives

L'étude hydrogéologique du double recoupement souterrain de méandre de la Lesse, à Furfooz, a permis une meilleure compréhension du fonctionnement de ce système karstique, développé dans les calcaires du Carbonifère. La disposition du système, avec plusieurs points d'observation sur la Lesse souterraine, constituait une opportunité de choix pour l'étude d'un système actif et la collecte de nombreuses données expérimentales.

Le premier objectif de ce travail consistait en une étude du comportement de la Lesse souterraine, de par la mise en place de cinq stations de mesure des paramètres, durant la période d'avril 2012 à mai 2013. L'analyse des chroniques de ces paramètres a constitué une première étape dans la caractérisation du réseau karstique actif.

Les chroniques limnimétriques et de débit ont montré que le niveau du système était imposé par le débit de la Lesse aérienne, à l'entrée du réseau. Les différences de niveau entre les stations amont et aval font apparaître des comportements différents en période de hautes et basses eaux. La remontée du niveau piézométrique régional durant les hautes eaux semble rééquilibrer les niveaux du système et diminue le gradient entre la perte et la résurgence. Les périodes d'étiage, au contraire, montrent une augmentation croissante du gradient d'écoulement entre les stations, à mesure qu'une sécheresse se prolonge. L'acquisition de chroniques piézométriques locales permettrait d'avoir une meilleure idée de la fluctuation de la nappe. Une analyse plus fine du comportement hydrologique du réseau pourrait ainsi être réalisée.

L'évolution de la température et de la conductivité électrique, mesurées aux différentes stations, est cohérente avec la situation dans le système. Les paramètres physico-chimiques de la Lesse, au Chantoir des Nutons, montrent une fluctuation typique d'un cours aérien, tandis que celle de la Lesse souterraine montre une relative stabilité, signe d'un équilibre avec l'environnement karstique. À ce titre, l'eau du Puits des Vaux présente une conductivité plus élevée, ce qui est le signe d'un séjour prolongé dans le système.

La seconde étape de l'étude concernait la réalisation d'une série d'essais de traçage sur le site de Furfooz. L'analyse de leurs résultats à l'aide du logiciel Qtracer2 (Field, 2002) a permis de calculer les paramètres d'écoulement et de transport caractérisant le système karstique. Il apparaît que le réseau est composé principalement d'une zone présentant les caractéristiques d'une rivière souterraine et d'une autre zone dans laquelle l'écoulement y est plus lent et diffusif en raison d'une augmentation considérable de la section d'écoulement. Deux traçages réalisés durant le printemps 2013 ont montré des doubles pics de restitution tout à fait inédits. Ce phénomène a été mis en relation avec le comportement de la zone d'écoulement lent, localisée entre le Trou qui Fume et le Puits des Vaux.

Sur base des nombreuses informations récoltées (observations, récits de plongée, chroniques limnimétriques et physico-chimiques, essais de traçage), un modèle conceptuel a été développé pour tenter d'expliquer le fonctionnement particulier de l'écoulement au niveau du Puits des Vaux. Celui-ci semble constituer un important volume d'eau immobile, annexé au drain principal de la Lesse souterraine, jouant ainsi le rôle de système capacitif.

Ce fonctionnement serait la cause des doubles restitutions observées lors des traçages. Malgré cela, un traçage en 2008 n'a pas présenté de double restitution, ce qui indique que le schéma de fonctionnement est probablement plus complexe. À ce jour, aucun lien n'a pu être mis en évidence entre les conditions hydrologiques de la Lesse souterraine et le phénomène de double transport, au niveau de la zone noyée du Puits des Vaux. Dans le futur, la réalisation d'autres essais de traçage, dans des conditions de débit variées, devrait permettre de récolter plus de données expérimentales, afin de cerner le comportement du réseau.

Le dernier objectif consistait en un dimensionnement de l'écoulement via une modélisation du réseau actif. Le logiciel Qtracer2, qui permet le calcul de paramètres géométriques, s'est avéré imprécis à ce niveau. La raison de cette inefficacité est que le modèle de Qtracer ne permet pas de discrétiser le milieu étudié. Les paramètres calculés par Qtracer représentent donc une moyenne sur l'ensemble du réseau.

C'est le logiciel OTIS (Runkel, 1998) qui a été utilisé pour modéliser le réseau, sur base des résultats des essais de traçage. Ce modèle permet la discrétisation du réseau ainsi que la prise en compte des effets d'emménagement temporaire induits par les zones d'eau immobile. La méthode, basée sur les résultats d'un traçage de mars 2013, a consisté en la réalisation de deux sous-modèles : une zone convective et une zone diffusive. La calibration des paramètres à partir des données d'essai de traçage a permis de définir les conditions d'écoulement et de transport pour chaque sous-système du réseau.

Les tests de sensibilité réalisés sur différents modèles ont montré que les paramètres les plus influents étaient la section principale d'écoulement et la section d'emménagement temporaire. Cette conclusion a démontré la bonne précision d'OTIS dans le dimensionnement du réseau, puisque des variations de ± 5 à 20 % de ces sections entraînent des changements importants au niveau des courbes modélisées. Les données d'essais de traçage supplémentaires ont permis la validation de certains paramètres du modèle pour des conditions hydrologiques variées. L'idéal serait de réaliser cette validation pour l'ensemble du système. Ce travail est rendu compliqué par le manque de connaissances à propos du fonctionnement du système karstique pour diverses conditions hydrologiques.

Ce travail a permis de montrer qu'un dimensionnement de réseau karstique était possible à partir d'un modèle simple et de résultats d'essais de traçage. Ceci encourage la réalisation d'autres travaux du même genre pour d'autres systèmes simples, dans le but d'acquérir une meilleure compréhension du fonctionnement des réseaux karstiques actifs.

Bibliographie

Bibliographie

ATKINSON T.C., SMITH D.I., LAVIS J.J., WHITAKER R.J., (1973) – Experiments in tracing underground waters in limestones, *J. Hydrol.*, n° 19, 323-349.

BENCALA K.E., WALTERS R.A., (1983) – Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream – A transient storage model, *Water Resources Research*, vol. 10, n° 3, 718-724.

BENCALA K.E., (1983) – Simulation of solute transport in a mountain pool-and-riffle stream with a kinetic mass transfer model for sorption, *Water Resources Research*, vol. 10, n° 3, 732-738.

BONNIVER I., (2011) – *Étude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation du « système-traçage » du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Massif de Boine – Belgique)*, Thèse de doctorat, Université de Namur – Faculté des Sciences – Département de géologie, 349 p.

BRAVARD J.P., PETIT F., (1997) – *Les cours d'eau – Dynamique du système fluvial*, Masson et Armand Collin Ed., Paris, 221 p.

CHAPRA S.C., CANALE R.P., (1988) – *Numerical methods for engineers*, 2d ed., New-York, McGraw-Hill, 812 p.

CHATWIN P.C., (1971) – On the interpretation of some longitudinal dispersion experiments, *J. Fluid. Mech.*, 48(4), 689-702.

DAVIS P.M., ATKINSON T.C., WIGLEY T.M.L., (2000) – Longitudinal dispersion in natural channels : 2, The roles of shear flow dispersion and dead zones in the River Severn, U.K., *Hydrology and Earth System Sciences*, 4(3), 355-371.

DE BETHUNE P., (1961) - Carte de la géologie de la Belgique, *Atlas de Belgique*, planche 8, Académie royale de Belgique, Comité national de géographie, Commission de l'Atlas national, Bruxelles.

DELCAMBRE B., PINGOT J.L., (1993) – *Carte géologique de Wallonie – Hastière-Dinant (53 7/8)*, Ed. Ministère de la Région Wallonne.

DE SCHEPPER G., (2007) – *Caractérisation hydrogéologique d'écoulements karstiques au sein de la Formation de Waulsort*, Mémoire ULB.

DEWAIDE L., BAELE J.-M., COLLON-DROUAILLET P., QUINIF Y., ROCHEZ G., VANDYCKE S., HALLET V., (soumis) – Dedolomitization process associated to karstification in the dolomitized waulsortian mudmounts

(Belgium), Acte de colloque, Ghost-Rock Karst Symposium, *Geologica Belgica*.

FETTER C.C., (1999) – *Contaminant hydrogeology*, MacMillan Publishing Co, New-york, 458 p.

FIELD M.S., (2002) – *The Qtracer2 program for tracer-breakthrough curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems*. Rep. EPA/600/R-02/01, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 179 p.

GASPAR E., (1987 a) – *Modern trends in tracer hydrology*, vol. I, CRC Press, Bocan Raton, Fla, 145 p.

GASPAR E., (1987 b) – *Modern trends in tracer hydrology*, vol. II, CRC Press, Bocan Raton, Fla, 137 p.

HAVRON C., VANDYCKE S., QUINIF Y., (2007) – Tectonique Meso-cénozoïque et dynamique karstique au sein des calcaires de Han-sur-Lesse, *Geologica Belgica*, vol. 10, n° 1-2, 93-107.

KEAREY P., BROOKS M., HILL I., (2002) – *An introduction to geophysical exploration (Third Edition)*, Blackwell Sciences Ltd, 262 p.

KILPATRICK F.A., WILSON J.F. Jr., (1989) – *Mesurement of time travel and dispersion in streams by dye tracing*, USGS-TWRI reports, book 3, chap. A9, 27 p.

LEES A., NOËL B., BOUW P., (1977) – The Waulsortian "Reefs" of Belgium. A progress report, *Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain*, XXIX, 289-315.

LEES A., HALLET V., HIBO D., (1985) – Facies variation in Waulsortian buildups, Part 1 ; A model for Belgium, *Geological Journal*, vol. 20, 133-158.

MALOSZEWSKI P., ZUBER A., (1990) – On the calibration and validation of mathematical models for the interpretation of tracer experiments in groundwater, *Adv. Water Resour.*, 15, 47-62.

MULL D.S., LIEBERMANN T.D., SMOOT J.L., WOOSLEY L.H., (1988) – *Application of dye-tracing techniques for determining solute-transport characteristics of ground water in karst terranes*, Rep. EPA 904/6-88-001, United States Environmental Protection Agency, Atlanta, Ga, 103 p.

NOGAREDE P., VANBRABANT Y., REKK S., HALLET V., (2003) – *Carte hydrogéologique de Wallonie – Hastière-Dinant (53/7-8)*, Ed. Ministère de la Région Wallonne.

POTY E., HANCE L., LEES A., HENNEBERT M., (2001) – Dinantian lithostratigraphic units (Belgium), *Geologica Belgica*, vol. 4, n° 1-2, 69-94.

QUINIF Y., (1977) – Essai d'étude synthétique des cavités karstiques de Belgique, *Revue Belge de géographie*, 101 (1-3), 115-173.

QUINIF Y., (1999) – Karst et évolution des rivières : le cas de l'Ardenne, *Geodynamica Acta*, 12 (3-4), 267-277.

QUINIF Y., VANDYCKE S., (2001) – Les phénomènes karstiques de la région de Han-sur-Lesse – Rochefort (Belgique), *Bulletin d'information du Bassin de Paris*, 38(1), 6-19.

RENTIER C., (2002) – *Méthode stochastique de délimitation des zones de protection autour des captages d'eau : Conditionnement par des mesures de conductivité hydraulique, de hauteur piézométrique et de résistivité électrique*. Annexe B : Principe de la tomographie électrique, Thèse de doctorat, Université de Liège, Faculté des Sciences appliquées, Département Géomac.

ROSSMAN L.A., (2000) – *EPANET 2, Users manual*, Rep. EPA/600/R-00/057, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, 200 p.

RUNKEL R.L., BROSHEARS, R.E., (1991) – *One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS) – A solute transport model for small streams*, University of Colorado, Boulder, Colorado, CADSWES, Technical Report 91-01, 85 p.

RUNKEL R.L., (1998) – *One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS) – A solute transport model for streams and rivers*, Water-Resources Investigation Report 98-4018, U.S. Geological Survey, Denver-COLORADO, 73 p.

SCHIESSER W.E., SILEBI C.A., (1997) – *Computation transport phenomena : numerical methods for the solution of transport problems*, Cambridge University Press, Cambridge, 457 p.

SCHUDEL B., BIAGGI D., DERVEY T., KOZEL R., MÜLLER I., ROSS J.H., SCHINDLER U., (2002) – Einsatz künstlichen Tracer in der Hydrogeologie – *Praxishilfe, Berichte des BWG*, Serie Geologie n° 3, 91 p. Publié également en français.

SUKHODOLOV A.N., NIKORA V.I., ROWINSKI P.M., CZERNUSZENSKO W., (1997) – A case study of longitudinal dispersion in small lowland rivers, *Water Environ. Resour.*, 97, 1246-1253.

VANDYCKE S., (2002) – Paleostress records in Cretaceous formations in NW Europe : extensional and strike-slip events in relationships with Cretaceous-Tertiary inversion tectonics, *Tectonophysics*, 357, 119-136.

VAN ES T.A.M., VAN WINKEL G.L., BROEKEMA W.E., LIPS R., SCHUURMANS T.J.C., (1992) – De Galerie des Sources in haar omgeving. Verslag van de Werkgroep Fysische Speleologie over haar onderzoek in en rond de Galerie des Sources (Houyet, België), *Speleo Nederland – PIERK Special*, 7^e Jaargang n° 2, 40 p.

VAN DEN BROECK E., MARTEL E.A., RAHIR E., (1910) – *Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique* (Tome II), H. Lamartin, Bruxelles, 806 p. + annexes.

WOLFF H.J., RADEKE K.H., GELBIN D., (1979) – Heat and mass transfer in packed beds, IV, Use of weighted moment to determine axial dispersion coefficients, *Chemical Eng. Science*, 34, 101-107.

Topographies des réseaux karstiques

GROUPE SPÉLÉO « LA CORDE » DINANT (2010) – Nouvelle topographie de la Galerie des Sources.

VAN DEN BROECK E., VAN DER MEIRSCH M., HOSSELET J., LAMESCH S., BARTHOLEYNS J.-P., MAERIEVOET E., VANDEPERRE F., VANSTAEYEN R., VERSCHUEREN D., MEERT F., DEKEYZER G., LEFEBVRE J., (2007) – Topographie du Trou qui Fume, Groupe des Recherches Spéléologiques interclub Hadès.

VAN DER SLEYEN P., (1961) – Topographie du Puits des Vaux.

WALCH E., (1991) – Nouvelle topographie du Trou de la Loutre, modification de la version de Spekul (1972).

Sites internet

CWEPSS – Atlas du karst wallon (Akwa) – <http://www.cwepss.org/atlasKarst.htm> (consulté pour la dernière fois le 31/05/13).

Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques – Etat des eaux en Région wallonne – <http://www.voies-hydrauliques.wallonie.be> (consulté pour la dernière fois le 31/05/13).

Site de la DGARNE – Application WebGIS de la nouvelle carte géologique de Wallonie au 1/25000 – <http://www.geologie.wallonie.be> (consulté pour la dernière fois le 31/05/13).

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Description du matériel de terrain utilisé

Courantomètre

Flo-Mate 2000 – Marsh McBirney

Gamme de mesure (vitesse du courant) :

-0,15 à 20m/sec

Résolution : 0,01m/sec $\pm 0,2\%$

GPS Différentiel

GPS1200 – Leica Geosystems

Précision : (X, Y) = 0,5 cm, (Z) = 1 cm

Sondes de terrain

Sonde (CTD – Diver) :

Niveau d'eau : 0 à 10m

Précision : $\pm 0,005\text{m}$

Température : -20 à 80°C

Précision : $\pm 0,1^\circ\text{C}$

Conductivité électrique : 10 à 120 $\mu\text{S/cm}$

Précision : $\pm 1 \mu\text{S/cm}$

Pas de temps : 1 seconde à 99 heures

Mémoire : 16000 données

Sonde (Mini – Diver) :

Niveau d'eau : 0 à 17,5m – Précision : $\pm 0,005\text{m}$

Température : -20 à 80°C – Précision : $\pm 0,1^\circ\text{C}$

Pas de temps : 0,5 seconde à 99 heures

Mémoire : 24000 données

Fluorimètres de terrain

Fluorimètre GGUN – FL30

Groupe géomagnétisme Neuchâtel

Limite de détection de l'uranine : $10^{-3} \mu\text{g/l}$

Limite de détection de la rhodamine : $10^{-2} \mu\text{g/l}$

Seuil de saturation : 2500 mV

Bruit de fond électronique : 0,01 mV

Gamme de turbidité : 0,02 à 400 NTU

Gamme de température : > à 2°C

Précision : $\pm 0,1^\circ\text{C}$

Pas de temps : 0,5 seconde minimum, programmable

Mémoire : 32 Mb

Annexe 2 : Description des substances de traçage (Schudel et al., 2002)

Uranine (Formule $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$)

Index de couleur : 45350

Spectre d'émission : 490/515 nm

C'est le traceur fluorescent le plus utilisé et le plus adéquat, en raison de sa très grande sensibilité de détection, de sa faible tendance à l'adsorption et de son prix relativement bas. Dans les conditions les plus favorables et dans de l'eau souterraine propre du point de vue optique, la limite de détection peut descendre jusqu'à 0,001 ppb (ou 0,001 $\mu\text{g/l}$). L'uranine est endommagée en présence d'agents oxydants tels que le chlore, le dioxyde de chlore et l'ozone, substances fréquemment utilisées dans le traitement de l'eau potable.

Rhodamine (Formule $\text{C}_{27}\text{H}_{29}\text{N}_2\text{NaO}_7\text{S}_2$)

Index de couleur : 45100

Spectre d'émission : 561/586 nm

Cette substance est inoffensive pour l'être humain et toxique pour l'environnement. C'est pourquoi, dans les eaux de surface, elle ne devrait être envisagée que dans des cas exceptionnels. En raison de sa tendance à l'adsorption, cette substance ne doit être envisagée, en milieu poreux, que pour des essais sur de courtes distances et dans des aquifères biens perméables.

Annexe 3 : Photographies

Planche 1 : Photographies – A : Injection d'uranine à la Galerie des Sources (G. Rochez), B : Relevé d'un fluorimètre de terrain, C : Injection de rhodamine dans le Chantoir des Nutons (L. Dewaïde), D : Jaugeage de la rivière souterraine à la Galerie des Sources (G. Rochez).



Planche 2 : Photographies - A : Positionnement de l'entrée inférieure de la Galerie des Sources au GPS différentiel, B : Dispositif de tomographie électrique, C : Vue du Trou de la Loutre (derrière les kayaks), D : Vue de la Lesse aérienne à l'amont du Chantoir des Nutons.

